

PANORAAMAKUVIEN STEREOMITTAUS

Diplomityö
Teknillinen korkeakoulu
Maanmittausosasto

Espoo, helmikuu 2002

Milka Nuikka



Työn valvoja: Prof. Henrik Haggrén
Työn ohjaaja: DI Tuija Pitkänen

Tekijä: Milka Nuikka**Työn nimi:** Panoraamakuvien stereomittaus**Päivämäärä:** 20.2.2002**Sivumäärä:** 68**Osasto:** Maanmittausosasto**Professuuri:** Fotogrammetria**Työn valvoja:** Professori Henrik Haggrén**Työn ohjaaja:** DI Tuija Pitkänen

Diplomityössä on tutkittu, miten panoraamakuvien mittaaminen onnistuu digitaalisessa stereotyöasemassa. Tutkimus tehtiin koetyönä orientoimalla ja mittaamalla kolmea panoraamakuvaparia, jotka olivat maakuvia.

Koetyössä käytetyt panoraamakuvat muodostettiin liittämällä yhteen samankeskisiä osakuvia. Liitos tehtiin projisoimalla osakuvat yhteiselle tasolle projektiivisellä muunnoksella. Kuva-aineiston hankintaan käytettiin tavallista digitaalikameraa.

Panoraamakuvien orientointi ja mittaus tehtiin Intergraphin ImageStation Digital Mensuration, -Stereo Display ja -DTM Collection ohjelmilla, jotka on alunperin suunniteltu ilmakuvien käsittelyyn. Jokainen kuvapari orientoitiin maasto-koordinaatistoon ensin keskinäisellä ja absoluuttisella orientoinnilla ja sen jälkeen ulkoisella orientoinnilla. Maakuvien poikkeava kuvausgeometria ilmakuviin verrattuna aiheutti ongelmia kahden kuvaparin kohdalla, kun orientointiohjelma jumiutui usein kesken laskennan. Kahdella kuvapareista ei ollut lainkaan tukipisteitä, joten ne orientoitiin maastokoordinaatteihin takymetrillä mitattujen piirretietojen avulla. Näiltä kuvilta mitattiin myös korkeusmallit.

Ulkoinen orientointi osoittautui kaikilla kuvapareilla tarkemmaksi kuin absoluuttinen orientointi. Takymetripiirteiden avulla orientoituilla kuvapareilla kuvatut alueet olivat keskimäärin 350 m ja 180 m leveitä ja mitattujen pisteiden tarkkuus ulkoisen orientoinnin jälkeen oli n. 0.3 m x, y, ja z-koordinaateille. Tukipisteiden avulla orientoitdulla kuvaparilla kuvatun alueen leveys oli n. 12 m ja koordinaattien tarkkuus n. 0.02 m.

Avainsanat: panoraamakuva, kuvien orientointi**Kieli:** suomi

Author: Milka Nuikka

Name of thesis: Stereo Measurement of Panoramic Images

Date: 20.2.2002

Number of pages: 68

Department: Surveying

Professorship: Photogrammetry

Supervisor: Professor Henrik Haggrén

Instructor: Tuija Pitkänen, Master of Science

This thesis deals with measurement of panoramic images. An experimental work was done with three panoramic image pairs, which were oriented and measured in a digital stereo workstation.

Panoramic images were created from cocentric image sequences. The image sequences were combined together by projecting them on same surface by a projective transformation. All the images were terrestrial images and they were taken with a digital camera.

The orientation and measurement of images were done with Intergraph's ImageStation Digital Mensuration, -Stereo Display and -DTM Collection programs, which are originally designed for aerial images. All the image pairs were oriented to object coordinates first with relative and absolute orientation and then with exterior orientation. Because the imaging geometry of terrestrial images is so different compared to aerial images, calculation of relative orientation was quite difficult for two image pairs. There were no control points for two image pairs so they were oriented to object coordinates using terrain features, which were measured with tachymeter. Elevation models were also measured from these two image pairs.

Exterior orientation turned out to be more accurate than absolute orientation for all the image pairs. In the image pairs, which were oriented with tachymeter features, the widths of the photographed areas were about 350 m and 180 m and the accuracy of measured points was about 0.3 m after exterior orientation. In the image pair, which was oriented with control points, the width of the photographed area was about 12 m and accuracy of points about 0.02 m.

Keywords: panoramic image, orientation of images

Language: Finnish

ALKULAUSE

Olen tehnyt diplomityöni olessani tutkimusapulaisena Teknillisen korkeakoulun Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratoriossa. Työssäni olen tutkinut panoraamakuvien soveltuvuutta stereokartoitukseen.

Esitän kiitokseni työn valvojalle professori Henrik Haggrénille ja työn ohjaajalle DI Tuija Pitkäselle. Lisäksi kiitokset koko laboratorion henkilökunnalle mukavasta työympäristöstä ja neuvoista, joita olen työskentelyni aikana saanut.

Espoo, helmikuu 2002



Milka Nuikka

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	PANORAAMAKUVA.....	2
2.1	PANORAAMAKUVAUS.....	2
2.1.1	<i>Laajakulmakamera.....</i>	<i>2</i>
2.1.2	<i>Panoraamakamera.....</i>	<i>3</i>
2.1.3	<i>Kalansilmäobjektiivi</i>	<i>3</i>
2.1.4	<i>Samankeskiset kuvasarjat</i>	<i>3</i>
2.2	PANOROIDUN MITTAKUVAN VALMISTAMINEN OSAKUVISTA.....	4
2.2.1	<i>Piirtovirheiden poisto</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Kuvien yhdistäminen.....</i>	<i>6</i>
2.2.3	<i>Valmis panoraamakuva.....</i>	<i>8</i>
2.3	PANORAAMAKUVIEN ESITTÄMINEN	9
2.3.1	<i>Tasoprojektio</i>	<i>9</i>
2.3.2	<i>Lieriöprojektio</i>	<i>9</i>
2.3.3	<i>Palloprojektio.....</i>	<i>10</i>
2.4	PANORAAMAKUVIEN KÄYTTÖ FOTOGRAMMETRIASSA.....	10
3	KUVIEN ORIENTOINNIT.....	12
3.1	SISÄINEN ORIENTOINTI	12
3.1.1	<i>Koordinaatistomuunnokset</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Piirtovirheet</i>	<i>15</i>
3.2	ULKONEN ORIENTOINTI	16
3.3	KESKINÄINEN ORIENTOINTI.....	18
3.4	ABSOLUUTTINEN ORIENTOINTI	19
4	KOETYÖ.....	21
4.1	KUVA-AINEISTON HANKINTA.....	21
4.2	STEREOTYÖASEMA	28
4.2.1	<i>Laitteisto.....</i>	<i>28</i>
4.2.2	<i>Ohjelmisto</i>	<i>28</i>
4.3	TYÖN KULKU	29
4.3.1	<i>Kuvapyramidin muodostus.....</i>	<i>29</i>
4.3.2	<i>Orientoinnit.....</i>	<i>29</i>

4.3.3	<i>Epipolaarikuvien muodostus</i>	33
4.3.4	<i>Korkeusmallin mittaaminen</i>	34
5	TULOSTEN TARKASTELU	35
5.1	ORIENTOINTIEN TARKKUUS	35
5.1.1	<i>Tunnusluvut</i>	35
5.1.2	<i>Kuvanottopaikat</i>	39
5.1.3	<i>Piirteet</i>	41
5.2	KORKEUSMALLIN TARKKUUS	41
5.3	VIRHELÄHTEET JA TARKKUUDEN PARANTAMINEN	42
6	YHTEENVETO	43
7	LÄHTEET	45
LIITE 1: JABAL HAROUN KARTTA		48
LIITE 2: TUKIPISTEIDEN PAIKAT KUVILLA		50
LIITE 3: TUNNUSLUKUJA		54

1 JOHDANTO

Diplomityössä on tutkittu panoraamakuvien soveltuvuutta mittaus- ja kartoitus-tehtäviin. Työ liittyy Jabal Haroun projektiin (Finnish Jabal Haroun project), jossa suoritetaan Jordaniassa sijaitsevan Aaroninvuoren luostarin arkeologisia kaivauksia ja dokumentointia. Teknillisen korkeakoulun Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorion tehtävänä projektissa on kehittää kaivauksiin sopivaa mittaus- ja mallinnustekniikkaa. Laajakulmaisuuksensa vuoksi panoraamakuvat sopivat tehtävään hyvin, koska mitattavana on laajoja maa-alueita ja kuoppia, joita ei saada kerralla mahtumaan yhteen kapeakulmaiseen kuvaan.

Tutkimus on tehty koetyönä orientoimalla ja mittaamalla kuvia digitaalisessa stereo-työasemassa. Koetyössä on käytetty osakuvista muodostettuja panoraamakuvia. Niiden etuna on, ettei kuvaamiseen tarvita erillistä panoraama- tai laajakulma-kameraa. Kun panoraamakuva rakennetaan osakuvista, sen leveyttä voidaan tarpeen mukaan kasvattaa niin, että kohde mahtuu aina kokonaan yhdelle kuvalle. Kuvat voidaan siis tarvittaessa ottaa läheltäkin kohdetta ja näin saada enemmän yksityis-kohtia näkyviin. Osakuvia ei kannata käsitellä yksittäisinä kuvina, vaan ne kannattaa yhdistää panoraamakuvaksi. Kuvien yhdistäminen on helppoa ja nopeaa. Se säästää aikaa ja vaivaa orientoinneissa, kun monen erillisen kuvan sijaan orientoitavana on vain yksi panoraamakuva. Tutkitietoakin tarvitaan tällöin vähemmän, koska sitä ei tarvitse olla jokaisen osakuvan alueella.

Diplomityössä on luvussa 2 kerrottu yleisesti panoraamakuvista ja siitä, miten panoroitu mittakuva muodostetaan samankeskeisistä osakuvista. Luku 3 sisältää teoriaa kuvien orientoinneista. Koetyön vaiheista sekä koetyössä käytetystä laitteistosta ja aineistosta on kerrottu luvussa 4. Koetyön tuloksia on tarkasteltu luvussa 5 ja luku 6 sisältää yhteenvedon.

Panoraamakuvia on fotogrammetriassa käytetty aikaisemmin melko vähän, mutta aiheesta voi lukea lisää esimerkiksi viitteistä Shum, 1998 ja Nasa, 2001. Shumin artikkeli käsittelee sisätilojen mittauksia panoraamakuvilta. Nasa on hyödyntänyt panoraamakuvia Mars-planeetan tutkimisessa.

2 PANORAAMAKUVA

Panoraamakuvaksi kutsutaan vaakasuunnassa poikkeuksellisen leveää kuvaa, jonka tarkoituksena on esittää suuri vaakasuuntainen näkökenttä. Panoraamakuvan korkeus-leveyssuhde (aspect ratio) on yleensä vähintään 1:2 ja vaakasuora katselukulma ulottuu 65°:sta aina täyteen ympyrään eli 360°:een tai ylikin. (Alavalkama, 2000)

Panoraamakuvaus on kehitetty matkimaan ihmisen näkemistä. Ihmisen silmät ovat rinnakkain ja lisäksi ihmisen pää kääntyy horisontaalisesti siten, että ihminen näkee loppujen lopuksi koko ympyrän melko vaivattomasti. Tästä syystä aivot hyväksyvät ympyräpanoraaman luonnollisena kuvana. (Lampinen, 1988)

2.1 Panoraamakuvaus

Panoraamakuvia voidaan kuvata laajakulmakameroilla, kääntyvälinssisillä ja kääntyvärunkoisilla panoraamakameroilla sekä tavallisilla kameroilla kääntämällä kameraa projektiokeskuksensa ympäri ja liittämällä kuvat jälkeinpäin yhteen panoraamakuvaksi. Lisäksi voidaan käyttää erikoisobjektiiveja tai objektiivin eteen kiinnitettäviä lisäkkeitä, jotka kasvattavat kuvakulmaa.

Eri menetelmillä on mahdollista saavuttaa erisuuruisia kuvakulmia. Myös kameroiden tarkennus- ja kuvapinnan muodot poikkeavat toisistaan.

2.1.1 Laajakulmakamera

Laajakulmakamera kuvaa leveitä tasoperspektiiviruutuja lyhyellä polttovälillä.

Objektiivin kuvakulma lävistäjän suuntaan on yli 100°, jopa 115°-120°. Laajakulmakameran heikkoutena on valon väheneminen kuvan reuna-alueilla. Reunojen alivalotus voidaan kuitenkin korjata suotimella, joka himmentää kuvan keskustan reunojen kanssa samalle valotustasolle. (Alavalkama, 2000)

2.1.2 Panoraamakamera

Kääntyvälinssisissä panoraamakameroissa linssi nimensä mukaisesti kääntyy kameran rungon ja filmin pysyessä paikoillaan. Filmi on kamerassa kaarevalla pinnalla, joten sen etäisyys linssistä on koko ajan sama. Valotusaukko on pystysuora kapea rako. Koska linssi ei voi kääntyä täyttä ympyrää, kameran kuvakulma rajoittuu 90-150 asteeseen. (Stern, 2001)

Kääntyvärunkoisilla panoraamakameroilla voidaan kuvata kerralla täydet 360°. Kameran runkoa käännettäessä myös filmi liikkuu kameran sisällä lieriöpinnalla ja filmiä valotetaan vähän kerrallaan kapean pystysuoran raon läpi. (Davidhazy, 1989)

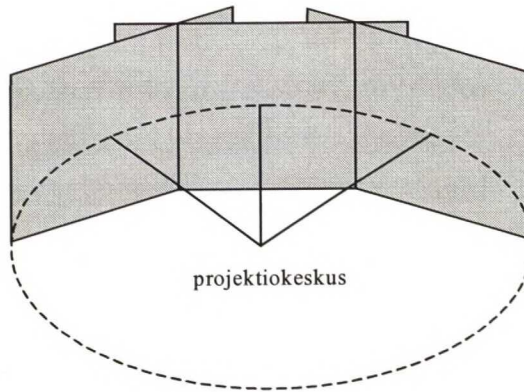
Digitaalikameroissa panoraamaominaisuus on toteutettu skannaavalla kuvailmaisinerivillä. (Charles, 1997)

2.1.3 Kalansilmäobjektiivi

Kuvakulmaa kasvattavia erikoisobjektiiveja ovat esimerkiksi ns. kalansilmäobjektiivit. Niillä saavutetaan suurimmat mahdolliset kuvakulmat 180°-220°. Kalansilmäobjektiivissa kuva tarkentuu pallopinnalle, mutta kamerassa se litistetään voimakkaan perspektiivimuunnoksen avulla filmille, joka on tasossa. (Alavalkama, 2000)

2.1.4 Samankeskiset kuvasarjat

Panoraamakuvia voidaan rakentaa liittämällä yhteen samasta kuvanottopisteestä otettuja kuvasarjoja. Näin tavallisellakin kameralla, jossa kuvakulma on vain n. 45°-50°, voidaan kuvata panoraamanäkymiä. Varsinkin digitaalikameraa käytettäessä menetelmästä on hyötyä, sillä digitaalikameroissa laajakulmaisuus on vielä melko harvinainen ominaisuus (Alavalkama, 2000). Samankeskinen kuvasarja kuvataan kääntämällä kameraa vähän kerrallaan kohteen yli niin, että vierekkäisille kuville tulee n. 20-30 %:n peitto. Kameran projektiokeskus pidetään kuvauksen aikana tarkasti paikallaan (Kuva 1). Mitä vähemmän projektiokeskus liikkuu sitä paremmin lopullinen panoraamakuva vastaa todellisuutta. (Haggrén, 1999)



Kuva 1: Samankeskinen kuvasarja. Kameran projektiokeskus pysyy paikallaan, kun kameraa käännetään.

2.2 Panoroidun mittakuvan valmistaminen osakuvista

Monilla kaupallisilla tietokoneohjelmilla voi toisiaan peittävistä kuvista koostaa saumattoman ja perspektiiviltään yhtenäisen panoraamakuvan. Ohjelmat tekevät yleensä automaattisesti kuvien yhteensovituksen, häivyttävät kuvien rajat ja muokkaavat perspektiivin lieriöperspektiiviksi. Kaikkia objektiivin piirtovirheitä ohjelmat eivät yleensä pysty poistamaan. (Alavalkama, 2000)

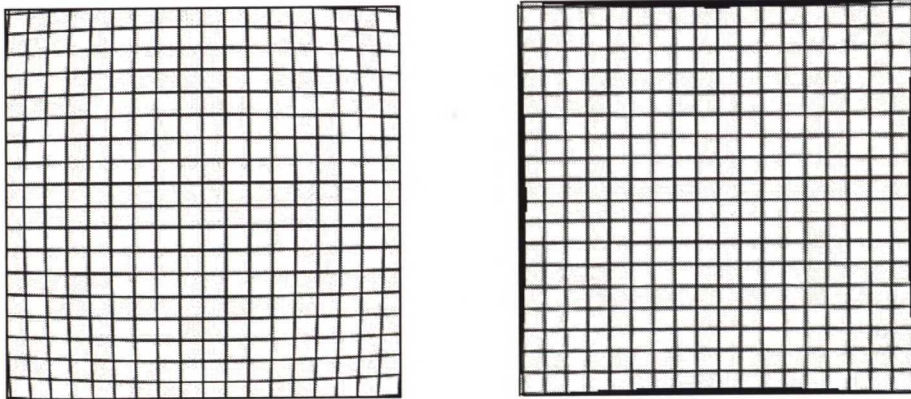
Yhteensovituksen tuloksena syntyy panoraamakuva, jota ei kuitenkaan välttämättä voida käyttää mittakuvana. Käyttäjä ei yleensä saa tarkkaa tietoa siitä, miten kaupalliset ohjelmat toimivat: Miten kuvien yhdistäminen tapahtuu, miten kuvat projisoidaan tai kuinka huolellisesti piirtovirheet poistetaan.

Jotta panoraamakuvaa voitaisiin käyttää mittaus- ja kartoitustehtäviin, osakuvat pitäisi liittää toisiinsa siten, että suuntahavainnot säilyisivät oikeina myös yhdistelmäkuvasa. Teknillisessä korkeakoulussa, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratoriossa on kehitetty kuvien yhdistämismenetelmä, joka perustuu valokuvan keskusprojektiio-ominaisuuksiin. Sen avulla samankeskkiset osakuvat pyritään liittämään toisiinsa siten, että yhden alkuperäisen kuvan keskusprojektiio säilyy yhdistelmäkuvasa. Näin muodostettu panoraamakuva vastaisi äärimmäisen laajakulmaisella objektiivilla otettua valokuvaa ja sitä voitaisiin käyttää mittauksiin. (Haggrén, 1999) Seuraavissa kappaleissa on kerrottu tarkemmin, mitä vaiheita kyseiseen menetelmään sisältyy.

2.2.1 Piirtovirheiden poisto

Ennen yhteensovitusta kuvista on poistettava piirtovirheet. Sitä varten on tunnettava kameraparametrit eli kameravakio, pääpisteen koordinaatit sekä objektiivin piirtovirheiden suuruus. Nämä saadaan selville kameran kalibroinnilla. Jos piirtovirheitä ei poisteta, kuvan muodostava sädekimppu jää vääristyneeksi ja virheet siirtyvät osakuvien kautta panoraamakuvalle. (Pöntinen, 2000) Tällöin panoraamakuva ei voi tarkalleen vastata keskusprojektiokuvaa.

Kuvassa 2 on esimerkki piirtovirheen vaikutuksesta. Vasemman puoleisessa kuvassa suorat viivat kuvautuvat kaareviksi piirtovirheiden takia. Oikean puoleisesta kuvasta virheet on poistettu ja viivat ovat suoria. Piirtovirhe voi vaikuttaa myös toiseen suuntaan, jolloin tynnyrimäisyyden sijaan kuvasta tulee tyynymäinen. Piirtovirhe ei myöskään aina ole symmetristä, vaan se voi vaikuttaa eri puolilla kuvaa eri tavoin. Asiaa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.1.2.



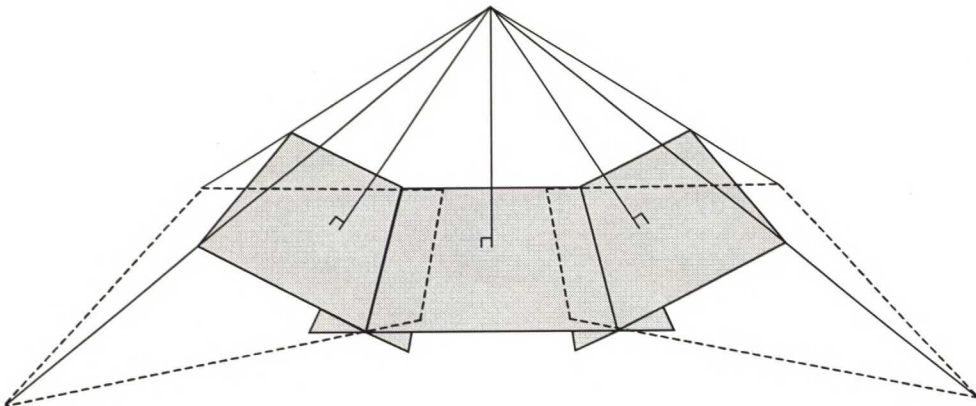
Kuva 2: Vasemman puoleisessa kuvassa piirtovirheiden vaikutus näkyy viivojen kaarevuutena. Oikean puoleisesta kuvasta piirtovirheet on poistettu.

2.2.2 Kuvien yhdistäminen

Kun piirtovirheet on poistettu, kuvat liitetään toisiinsa projisoimalla ne yhteiselle tasolle (Kuva 3). Tasoprojektio tehdään oikaisemalla kuva naapurikuvaan projektiivisellä muunnoksella, joka ei muuta kuvan perspektiiviä (Kaavat 1 ja 2). (Haggrén, 1999) Projektiivisessä muunnoksessa on kahdeksan muunnosparametria a_1, a_2, \dots, a_8 , joiden ratkaisemiseksi kuvaparilta täytyy havaita vähintään neljä yhteistä pistettä.

$$x_2 = \frac{a_1 x_1 + a_2 y_1 + a_3}{a_7 x_1 + a_8 y_1 + 1} \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{a_4 x_1 + a_5 y_1 + a_6}{a_7 x_1 + a_8 y_1 + 1} \quad (2)$$



Kuva 3: Samankeskiset osakuvat projisoidaan yhteiselle tasolle projektiivisellä muunnoksella.

Tarkempaan ratkaisuun päästään, jos laskennassa käytetään neljän yhteisen pisteen sijaan koko peittoalueen pikseleiden harmaasävyarvoja. Tällöin ratkaisu perustuu kahteen ehtoon: Vastinpisteparin (x_1, y_1) ja (x_2, y_2) harmaasävyarvot $g_1(x_1, y_1)$ ja $g_2(x_2, y_2)$ ovat samat ja kaavat 1 ja 2 pätevät pisteparille.

Tehtävänä on tällöin löytää parametrijoukko (a_1, \dots, a_8) , joka minimoi summan $\sum (g_1(x_1, y_1) - g_2(x_2, y_2))^2$. Koska muunnosparametrien likiarvot tunnetaan, voidaan käyttää katkaistua Taylorin sarjaa ja ketjusääntöä (Kaava 3) (Pöntinen, 2000).

$$g_1(x_1, y_1) \approx g_2(x_2^0, y_2^0) + \left(\frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial a_j} + \frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial y_2} \frac{\partial y_2}{\partial a_j} \right) \Delta a_j + \dots$$

(3)

$$+ \left(\frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial a_8} + \frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial y_2} \frac{\partial y_2}{\partial a_8} \right) \Delta a_8$$

jossa (x_2^0, y_2^0) on likiarvo koordinaattiparille (x_2, y_2) .

Osittaisderivaatat $\partial g_2 / \partial x_2$ ja $\partial g_2 / \partial y_2$ approksimoidaan käyttäen harmaasävyarvoja.

Tämä voidaan tehdä esimerkiksi kaavoilla 4 ja 5.

Koska x_2^0 ja y_2^0 eivät yleensä ole kokonaislukuja, $g(x_2^0, y_2^0)$ täytyy interpoloida.

$$\frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial x_2} = g_2(x_2^0 + 1, y_2^0) - g_2(x_2^0 - 1, y_2^0) \quad (4)$$

$$\frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial y_2} = g_2(x_2^0, y_2^0 + 1) - g_2(x_2^0, y_2^0 - 1) \quad (5)$$

Kaavaa 3 laajennetaan niin, että se sisältää yhden pikselin sijaan koko peittoalueen pikselit. Uusi kaava voidaan kirjoittaa matriisimuotoon:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \Delta_p - \mathbf{l} \quad (6)$$

jossa matriisin $\mathbf{A}_{n \times 8}$ elementit ovat

$$\alpha_{ij} = \frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial a_j} + \frac{\partial g_2(x_2^0, y_2^0)}{\partial y_2} \frac{\partial y_2}{\partial a_j} \quad (7)$$

ja vektorin $\mathbf{l}_{n \times 1}$ elementit ovat

$$l_i = g_1(x_{1i}, y_{1i}) - g_2(x_{2i}^0, y_{2i}^0) \quad (8)$$

Vektori $\Delta_{p \times 8 \times 1}$ sisältää muunnosparametrien korjaukset ja vektori $\mathbf{v}_{n \times 1}$ on jäännös-
virhevektori. Jäännösvirheiden neliösumman $(\mathbf{v}^T \mathbf{v})$ minimointi johtaa kaavaan 9,
josta voidaan ratkaista muunnosparametrien a_1, \dots, a_8 korjaukset Δ_p .

$$\Delta_p = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (9)$$

Korjauksilla päivitetään muunnosparametreja, jonka jälkeen voidaan taas laskea uudet korjaukset. Iterointia jatketaan kunnes korjaukset ovat tarpeeksi pieniä tai kunnes maksimimäärä iterointikierroksia on käyty läpi. (Pöntinen, 2000)

2.2.3 Valmis panoraamakuva

Panoraamakuvalle lasketaan osakuvien yhdistämisen aikana pääpisteen kuva-koordinaatit. Tämä pääpiste sijaitsee samassa kohdassa kuin oikaisussa paikallaan säilyneen kuvan pääpiste.

Koska kuvia ei voida koko täysympyrän osalta esittää tasoprojektiossa, täytyy muutaman kuvan yhdistämisen jälkeen siirtyä lieriöprojektiioon. (Haggrén, 1999)

2.3 Panoraamakuvien esittäminen

Panoraamakuvia voidaan esittää tietokoneen näytöllä, paperivedoksina tai erikoisprojektoreilla (Alavalkama, 2000). Realistinen vaikutelma saadaan aikaan, kun kuvat esitetään kameran tarkennuspinnan muotoa vastaavalla pinnalla ja kuvaustilannetta vastaavassa katselukulmassa eli laajakulmakameran kuva tasolla, kääntyvälinssisen ja -runkoisen panoraamakameran kuva lieriöpinnalla ja kalansilmäkuva pallopinnalla. (Dersch, 1998) Tietokonekuvassa projektio voidaan muokata sopivaan muotoon aina tarpeen mukaan, vaikka kuvamateriaali olisi alkujaan tietyssä projektiossa.

2.3.1 Tasoprojektio

Laajakulmakamerassa kuva tarkentuu tasolle. Tasoprojektiossa kaikki suorat viivat kuvautuvat suorina. Kuvan mittakaava ei kuitenkaan säily vakiona, vaan se kasvaa sitä suuremmaksi mitä kauemmaksi kuvan keskipisteestä siirrytään eli kuva venyy reunoiltaan sitä enemmän mitä suuremmaksi kuvakulma kasvaa. Tasoprojektiossa on mahdotonta esittää kuvakulmaltaan yli 180 asteen kuvia, koska tällöin kuva kasvaisi äärettömän suureksi. Käytännössä kuvakulma jää reilusti alle tämän rajan. (Charles, 1997)

2.3.2 Lieriöprojektiio

Panoraamakamerassa kuva tarkentuu lieriöpinnalle. Lieriöprojektiossa pystysuorat viivat kuvautuvat suorina ja vaakasuorat viivat, paitsi horisontti, kaarevina. Projektio ei venytä kuvaa leveyssuunnassa, mutta korkeussuunnassa kuva venyy sitä enemmän mitä kauemmaksi horisontista siirrytään. Lieriöprojektiossa ei siis kannata esittää kovin korkeakulmaisia kuvia. Projektio toimii hyvin, kun kuvan korkeuskulma on välillä $\pm 45^\circ$ ja käyttökelpoinen se on noin $\pm 60^\circ$:seen saakka (Panoptic Vision, 2000). Jos kuvakulma kasvaa korkeammaksi, kuva venyy ylä- ja alareunastaan niin paljon, että havainnollisuus kärsii. Leveyssuunnassa lieriöprojektiossa voidaan esittää täysi ympyrä eli 360° . Lieriöprojektion etuna on, että lieriötä voidaan käsitellä myös kaksiulotteisena kuvana.

2.3.3 Palloprojektio

Kalansilmälinssiä käytettäessä kuva tarkentuu pallopinnalle. Palloprojektiossa kaikki suorat viivat, paitsi ne, jotka kulkevat kuvan keskipisteen kautta, kuvautuvat kaarevina. Mitä kauempana kuvan keskustasta viiva sijaitsee sitä voimakkaammin se kaartuu. (Charles, 1997) Tämän vuoksi kuva näyttää tynnyrimäiseltä ja kohde ikään kuin pakkautuu kuvan reunoille. Palloprojektio ei venytä kuvaa mihinkään suuntaan, joten sen avulla voidaan esittää kuvia, joiden vaakakulma ulottuu 360 asteeseen ja pystyakulma 180 asteeseen (Dersch, 1999).

2.4 Panoraamakuvien käyttö fotogrammetriassa

Panoraamakuvia voidaan käyttää mittakuvina, kun kuvien geometria tunnetaan. Ne sopivat hyvin etenkin laajojen alueiden ja suljettujen sisätilojen mittaukseen. Normaalisti tällaiset kohteet eivät mahtuisi kokonaan yhdelle kapeakulmaiselle kuvalle, vaan kohteen mittaamiseen tarvittaisiin useita erillisiä kuvia. Panoraamakuvien etuna on myös se, että orientoinneissa käytettäviä tukipisteitä osuu enemmän yhden kuvan alueelle, koska yksi kuva kattaa kerralla suuremman alueen. Panoraamakuvia on fotogrammetriassa käytetty melko vähän, mutta alla on muutama esimerkki siitä, miten panoraamakuvia on käytetty laajojen alueiden ja suljettujen tilojen mittauksessa.

Apollo 17 kuvasi Kuun pintaa vuonna 1972. Käytössä oli mm. kääntyvälinssinen panoraamakamera (kuvakulma 108°), jolla otettiin sekä tavallisia että stereo-panoraamakuvia. Suurin osa panoraamakuvista otettiin Kuun kiertoradalta n. 110 kilometrin korkeudesta. Ne kattoivat Kuun pinnasta alueen, joka oli kooltaan n. 20 km x 230 km. Kuvien resoluutio oli suuri ja niiltä pystyi erottamaan n. 1-2 metrisiä kohteita. Panoraamakuvia käytettiin apuna erilaisissa tieteellisissä tutkimuksissa ja dokumentoinnissa. Niiden avulla tutkittiin Kuun pinnan geologiaa sekä tuotettiin topografista karttaa. (Lunar and Planetary Institute, 2001)

Mars Pathfinder kuvasi Mars-planeettaa vuonna 1997. Kuvaus tehtiin Marsin pinnalta stereokameralla. Kamera kuvasi kapeita kaistaleita, jotka yhdistettiin toisiinsa panoraamakuvaksi. Kuvia käytettiin maaston rakenteen, rinteiden ja kivenlohkareiden havainnointiin. Näin tutkijat saivat tietoa geologisista prosesseista ja ilmastollisista olosuhteista, jotka olivat muovanneet Marsia. Kuvien avulla ohjailtiin myös Sojourner robotin kulkua, joka kävi ottamassa näytteitä Marsin pinnasta. Lisäksi stereopanoraamakuvia käytettiin alueen fotorealistisen 3D-pintamallin muodostamiseen. (Nasa, 2001)

Sisätiloja on mallinnettu yksittäisiltä panoraamakuvilta ja panoraamakuvasarjoilta. Kyseisessä projektissa panoraamakuvat oli rakennettu yksittäisistä osakuvista, jotka oli kuvattu kääntämällä kameraa projektiokeskuksensa ympäri. Mallinnuksen tuloksena saatiin tarkkoja 3D-rautalankamalleja ja fotorealistisia 3D-malleja. (Shum, 1998)

3 KUVIEN ORIENTOINNIT

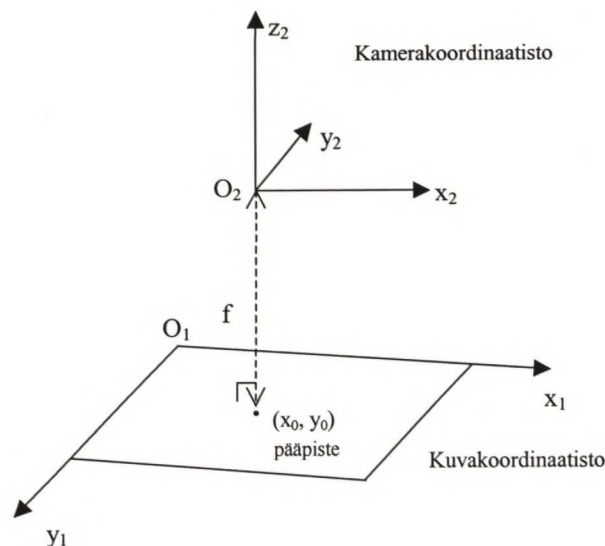
Kuvien orientoinneilla ratkaistaan muunnokset kuvakoordinaatiston ja kohdekoordinaatiston välillä. Orientointien jälkeen kaikille kuvapisteille ja kuvien projektiokeskuksille voidaan laskea 3D-koordinaatit yhteisessä kohdekoordinaatistossa. (Haggrén, 2001)

3.1 Sisäinen orientointi

Sisäisellä orientoinnilla määritetään kameran projektiokeskuksen paikka kuvatasoon nähden. Parametreina käytetään kameravakiota ja pääpisteen koordinaatteja, jotka saadaan selville kameran kalibroinnilla. Lisäksi määritetään sädekimpun mahdolliset muodonmuutokset eli piirtovirheet. (Schwidefsky, 1978)

Sisäinen orientointi ratkaistaan laskemalla ensin muunnos, jolla kuvahavainnot voidaan muuntaa kamerakoordinaatistoon. Kamerakoordinaatisto on suorakulmainen 3D-koordinaatisto, jonka origo on kameran projektiokeskuksessa (Kuva 4).

Lopuksi muunnosta korjataan poistamalla linssien valmistuksesta ja asennuksesta aiheutuneet piirtovirheet. Hyvin tarkoissa töissä otetaan lisäksi huomioon ilmakehän aiheuttama refraktio ja maanpinnan kaarevuus.



Kuva 4: 2D-kuvakoordinaatiston ja 3D-kamerakoordinaatiston välinen yhteys.

3.1.1 Koordinaatistomuunnokset

Digitaalikameran kuvat

Muunnos 2D-kuvakoordinaatistosta 3D-kamerakoordinaatistoon:

$$\begin{aligned}x_2 &= (x_1 - x_0)p_x \\y_2 &= -(y_1 - y_0)p_y \\z_2 &= -f\end{aligned}\tag{10}$$

Kaavassa 10:

(x_0, y_0) = pääpisteen kuvakoordinaatit pikseleinä

(x_1, y_1) = muunnospisteen kuvakoordinaatit pikseleinä

(x_2, y_2, z_2) = muunnospisteen kamerakoordinaatit

(p_x, p_y) = kuvapikselin koko

f = kameravakio

(Schenk, 1999)

Digitaalikameralla otettujen kuvien pääpisteen pikselikoordinaatit ja kameravakio saadaan kameras kalibroititodistuksesta ja ne voidaan sijoittaa suoraan kaavaan 10. Digitoiduilla kuvilla pääpisteen pikselikoordinaatteja ei tiedetä, joten ratkaisu on erilainen.

Digitoidut kuvat

Mittakameralla otetuissa kuvissa on reunamerkit, joiden suhteen projektiokeskuksen sijainti tunnetaan. Reunamerkkien koordinaatit saadaan kameras kalibroititodistuksesta. Ensin ratkaistaan muunnos pikselikoordinaatiston ja reunamerkki-koordinaatiston välillä. Käytännössä tämä tapahtuu muuntamalla reunamerkkien mitatut pikselikoordinaatit 2D-muunnoksella vastaamaan kameras kalibroititodistuksessa annettuja arvoja. (Schenk, 1999)

Muunnos voidaan tehdä esimerkiksi Helmert-muunnoksella eli 4-parametrisella yhdenmuotoisuusmuunnoksella (Kaava 11). Muunnoksessa skaalaus ja kierto ovat yhtä suuret sekä x- että y-koordinaatille, joten se ei muuta kohteen muotoa.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kaavassa 11:

(x_1, y_1) = piste pikselikoordinaateissa

(x_2, y_2) = piste reunamerkkikoordinaateissa

λ = mittakaavakerroin, joka on verrannollinen pikseleiden kokoon

α = koordinaatiston kiertokulma

(t_x, t_y) = koordinaatiston siirrot

(Moffit, 1980)

Muunnoksesta saadaan joustavampi laajentamalla se 6-parametriseksi affiiniseksi muunnokseksi, jolloin x- ja y-koordinaatteja kierretään ja skaalataan toisistaan riippumatta. Affiinisuuutta eli koordinaatiston poikkeamaa suorakulmaisuuudesta merkitään tässä kulmalla δ . Se on yleensä niin pieni, että voidaan käyttää approksimaatiota $\sin \delta = \delta$ ja $\cos \delta = 1$. (Kaava 12)

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha - \delta \sin \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha + \delta \cos \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_x x_1 \\ \lambda_y y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

(Moffit, 1980)

2-D muunnosta voidaan edelleen laajentaa 8-parametriseksi projektiiviseksi muunnokseksi tai joksikin korkeampiasteiseksi muunnokseksi, jolloin koordinaattien jäännösvirheet pienenevät.

Kun muunnos pikselikoordinaateista reunamerkkikoordinaatistoon on ratkaistu, muunnetaan kuvakoordinaatit vielä kamerakoordinaatistoon kaavalla 13.

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 - x_0 \\y_2 &= y_1 - y_0 \\z_2 &= -f\end{aligned}\tag{13}$$

kaavassa 13:

(x_0, y_0) = pääpisteen kuvakoordinaatit

(x_1, y_1) = muunnospisteen kuvakoordinaatit

(x_2, y_2, z_2) = muunnospisteen kamerakoordinaatit

f = kameravakio

(Schenk, 1999)

3.1.2 Piirtovirheet

Piirtovirheillä tarkoitetaan kuvan optiselta akselilta lähtien mitattujen etäisyyksien poikkeamia tarkan keskusprojektiokuvan vastaavista etäisyyksistä. (Schwidersky, 1978)

Piirtovirheet voidaan jakaa radiaalisiin ja tangentialisiin virheisiin. Radiaalinen eli säteittäinen piirtovirhe aiheutuu linssien yksilöllisistä valmistusvirheistä, kun linsejä ei pystytä hiomaan täysin symmetrisiksi. Radiaalinen virhe siirtää kuvapistettä pääpisteen suuntaan tai siitä poispäin. Siirtyminen voi olla symmetristä tai epäsymmetristä. Symmetrinen virhe on tietyllä etäisyydellä pääpisteestä joka suunnassa yhtä suuri. (Haggrén, 2001)

Tangentialinen virhe eli epäkeskisyysvirhe aiheutuu linssien asennuksesta. Kaikkia linsejä ei pystytä keskistämään tarkasti optiselle akselille. Tangentialinen piirtovirhe vaikuttaa kohtisuoraan säteittäiseen piirtovirheeseen nähden ja on yleensä niin pieni, ettei sitä välttämättä tarvitse huomioida.

Piirtovirheiden suuruus määritetään kameran kalibroinnin yhteydessä.

3.2 Ulkoinen orientointi

Ulkoisella orientoinnilla ratkaistaan yksittäisen kuvan paikka ja asento kohdekoordinaatistossa. Kuvan paikka on kameran projektiokeskuksen sijainti kohdekoordinaatistossa ja asennon määräävät kamera- ja kohdekoordinaattien väliset kiertokulmat. Orientointiparametreja on siis kuusi kappaletta $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ ja niiden ratkaisemiseksi tarvitaan vähintään kolme X, Y, Z tukipistettä. (Schwidersky, 1978)

Ulkoiden orientoinnin ratkaisu perustuu kollineaarisuusehtoon, jonka mukaan kameran projektiokeskus, kuvapiste ja kohdepiste sijaitsevat samalla suoralla (Kuva 5). Ehto voidaan kirjoittaa kollineaarisuusyhtälöiksi (Kaava 14):

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{(X - X_0)r_{11} + (Y - Y_0)r_{12} + (Z - Z_0)r_{13}}{(X - X_0)r_{31} + (Y - Y_0)r_{32} + (Z - Z_0)r_{33}} \\ y &= -f \frac{(X - X_0)r_{21} + (Y - Y_0)r_{22} + (Z - Z_0)r_{23}}{(X - X_0)r_{31} + (Y - Y_0)r_{32} + (Z - Z_0)r_{33}} \end{aligned} \quad (14)$$

jossa r_{11}, \dots, r_{33} ovat kiertomatriisin $R_{\omega\varphi\kappa}$ elementit (Kaava 15)

$$R_{\omega\varphi\kappa} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \cos\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix}$$

Kaavoissa 14 ja 15:

(x, y) = pisteen kamerakoordinaatit

(X, Y, Z) = pisteen kohdekoordinaatit

(X_0, Y_0, Z_0) = projektiokeskuksen sijainti kohdekoordinaatistossa

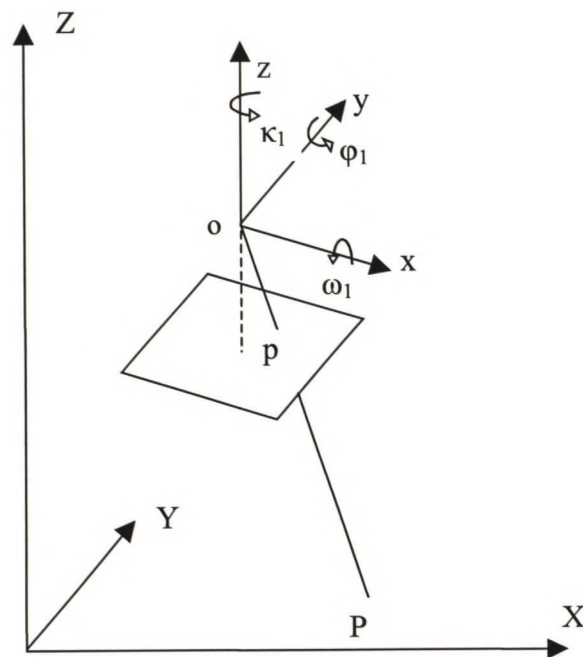
f = kameravakio

ω = koordinaatiston kierto x-akselin ympäri

φ = koordinaatiston kierto y-akselin ympäri

κ = koordinaatiston kierto z-akselin ympäri

(Schenk, 1999)



Kuva 5: Kollineaarisuusehdon mukaan projektiokeskus o , kuvapiste p ja kohdepiste P ovat samalla suoralla

3.3 Keskinäinen orientointi

Keskinäisellä orientoinnilla määritetään kuvaparin keskinäinen asema samaksi kuin se oli kuvanottotilanteessa. Tällöin kuvien vastinsädeparit leikkaavat toisensa ja leikkauspisteet muodostavat yhdessä mallin, joka on geometrisesti yhdenmuotoinen kohteen kanssa (Kuva 6). (Schwidesky, 1978)

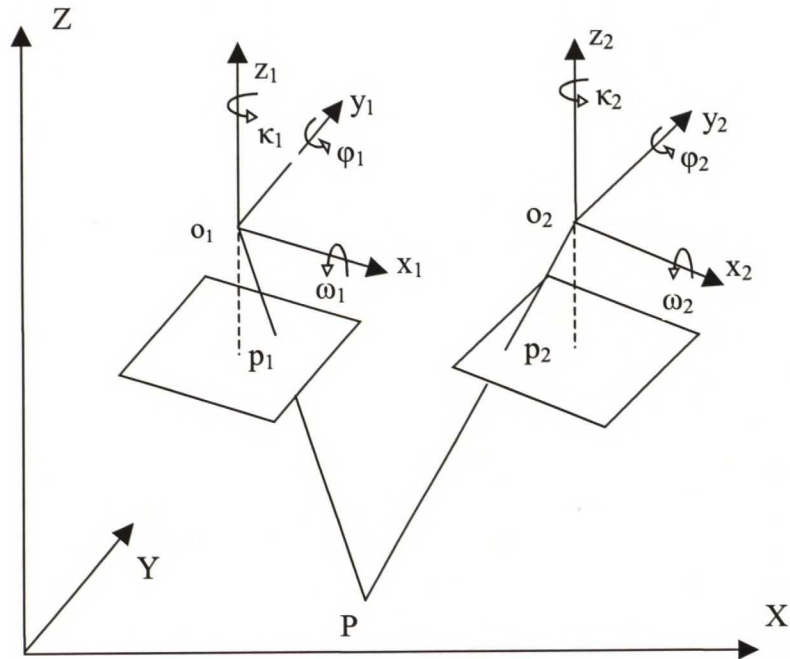
Ennen keskinäistä orientointia kuvien vastinsädeparit eivät leikkaa toisiaan. Sen sijaan ne leikkaavat projektiotason eri pisteissä. Tästä aiheutuvat koordinaattierot voidaan jakaa X- ja Y-parallakseiksi. Y-parallaksit häviävät, kun orientointi on suoritettu oikein eli kun vastinsädeparit leikkaavat toisensa. X-parallaksit sen sijaan eivät häviä, mikä johtuu mallipisteiden korkeuseroista projektiotasoon nähden. (Schwidesky, 1978)

Myös keskinäinen orientointi voidaan ratkaista kollineaarisuusyhtälöiden avulla (Kaava 14). Koska orientoitavana on kuvapari, orientointiparametreja on 12 kappaletta eli molempien kuvien asennot ja projektiokeskusten paikat.

Keskinäisessä orientoinnissa on viisi vapausastetta. Näin ollen orientointi voidaan ratkaista viiden orientointiparametrin avulla ja pitää loput seitsemän parametria vakioina. Muuttuvat parametrit voidaan valita monellakin tavalla, mutta yleensä keskinäisen orientoinnin suorittamiseen käytetään joko kuvakierto- tai kuvaliitosmenetelmää. Kohdekoordinaatistona voidaan pitää vasemmanpuoleisen kuvan kamerakoordinaatistoa. (Schenk, 1999)

Kuvaliitosmenetelmässä orientointi tehdään siirtämällä ja kiertämällä vain oikeanpuoleista kuvaa vasemmanpuoleisen kuvan pysyessä paikallaan. Muuttujina ovat tällöin Y_{02} , Z_{02} , ω_2 , φ_2 , κ_2 .

Kuvakiertomenetelmässä kierretään molempia kuvia, mutta siirtoja ei tarvita. Muuttujina ovat siis φ_1 , κ_1 , ω_2 , φ_2 , κ_2 . (Schwidesky, 1978)



Kuva 6: Keskinäisen orientoinnin jälkeen kuvapistet p_1 ja p_2 kuvautuvat mallikoordinaatistossa yhdeksi pisteeksi P.

3.4 Absoluuttinen orientointi

Absoluuttisella orientoinnilla määritetään keskinäisessä orientoinnissa muodostetun stereomallin suhde kohdekoordinaatistoon.

Orientointi ratkaistaan laskemalla muunnos, jolla mallikoordinaatit voidaan muuntaa kohdekoordinaatistoon. Koska malli on geometrisesti yhdenmuotoinen kohteen kanssa, tehtävään voidaan käyttää kolmiulotteista yhdenmuotoisuusmuunnosta (Kaava 16). Muunnoksessa on 7 riippumatonta parametria, joiden ratkaisemiseksi tarvitaan tukipisteitä. Yksinkertaisimmassa tapauksessa tarvitaan vähintään 2 taso- ja 3 korkeustukipistettä eripuolilta kuvaa. (Schwidefsky, 1978)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda R_{\omega \varphi \kappa} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

jossa kiertomatriisi $R_{\omega \varphi \kappa}$ saadaan kaavasta 15

Kaavassa 16:

(x, y, z) = mallikoordinaatit

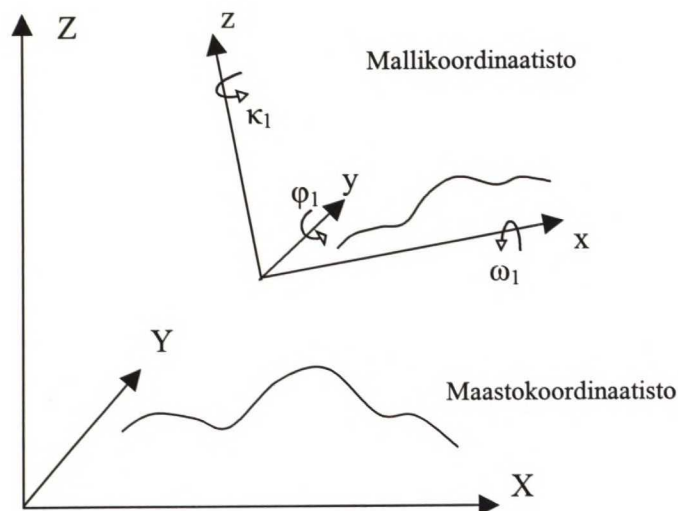
(X, Y, Z) = kohdekoordinaatit

λ = mittakaavakerroin

$(\omega, \varphi, \kappa)$ = koordinaatiston kierrot

(t_x, t_y, t_z) = koordinaatiston siirrot

(Kraus, 1993)



Kuva 7: Muunnos mallikoordinaatistosta kohdekoordinaatistoon

4 KOETYÖ

Koetyössä tutkittiin, miten panoraamakuvien orientointi ja mittaaminen onnistuu digitaalisessa stereotyöasemassa. Koetyö tehtiin orientoimalla maastokoordinaatistoon kolme maapanoraamakuvaparia (Kuvat 8, 9 ja 10). Kuvapareilla 8 ja 9 ei ollut tukipisteitä, joten orientoinnit tehtiin maastosta mitattujen piirretietojen avulla. Kuvaparin 10 orientointiin käytettiin tukipisteitä. Näin saatiin tietoa molempien menetelmien toimivuudesta. Lopuksi kuvapareilta 8 ja 9 mitattiin korkeusmallit.

4.1 Kuva-aineiston hankinta

Koetyössä käytetyt panoraamakuvat oli koottu samankeskeisistä osakuvista. Kuvat 8 ja 9 on otettu syyskuussa 2000 Jordaniassa, Aaroninvuorella. Kuvissa näkyy pätkä muinaista tietä ja sen lähiympäristöä. Kuvanottopaikan koordinaatteja ei tiedetä, mutta kuvakannat ja etäisyydet kuvissa näkyvään tiehen ovat kuvaparilla 8 n. 13 m ja 120 m sekä kuvaparilla 9 n. 8 m ja 70 m. Kuvapari 10 on otettu elokuussa 2001 Teknillisen korkeakoulun päärakennuksen amfista. Kuvanottopaikan koordinaatit tiedetään n. 2 cm:n tarkkuudella. Kuvakanta on n. 0.5 m ja etäisyys kohteen etualaan n. 5 m.

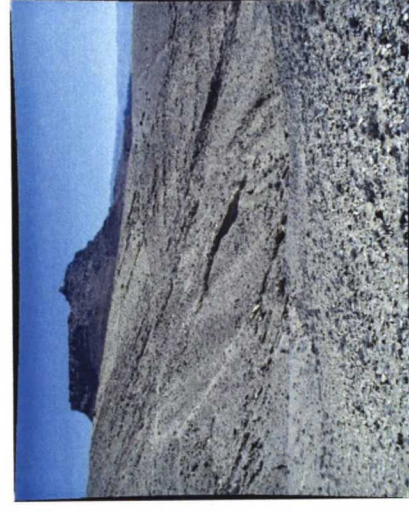
Kuvat on otettu Olympus Camedia C-1400 L digitaalikameralla, polttovälillä 1402 pikseliä. Alkuperäisten kuvien koko on 1280 x 1024 pikseliä.

Kuvausta varten kamera kiinnitettiin jalustalle ristiluistin päälle. Ristiluistin avulla kameran projektikeskus saatiin pysymään paikallaan, kun kameraa käännettiin. Kuvauksessa vierekkäisille osakuville tuli n. 30 %:n peitto.

Samankeskeisistä kuvasarjoista muodostettiin panoraamakuvat kappaleen 2.2 menetelmällä. Kuvat 8 ja 10 on koottu kolmesta osakuvasta, jolloin keskimäinen kuva on pidetty yhdistämisen aikana paikallaan ja reunimmaiseta kuvata on projisoitu sen kanssa samalle tasolle. Kuva 9 on koostuu kahdesta osakuvasta, joista oikean puoleinen kuva on pidetty yhdistämisen aikana paikallaan.

Ennen kuin kuvat siirrettiin stereotyöasemaan, niistä rajattiin pois ylimääräiset reunat alueet. Näin saatiin pienennettyä kuvakokoa menettämättä mitään oleellista tietoa. Kun kuvan kokoa oli muutettu, täytyi pääpisteelle laskea uudet kuvakoordinaatit.

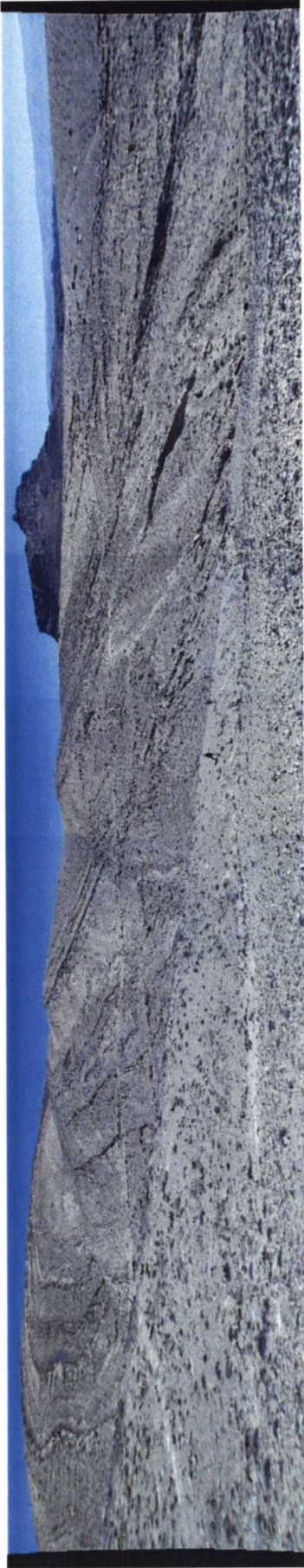
Seuraavilla sivuilla esitellään käytettyä kuva-aineistosta. Kuvaparista 8 esitetään stereopanoraamaparin vasemman puoleisen kuvan muodostus vaihe vaiheelta. Kuvapareista 9 ja 10 esitetään vain valmiit panoraamakuvat.



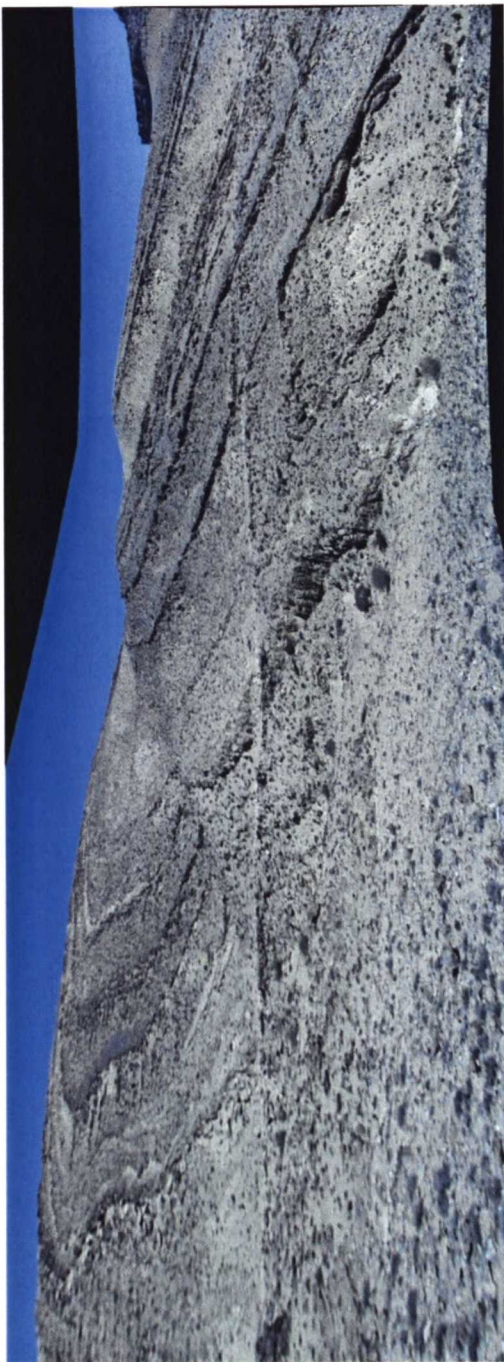
Kuva 8a: Panoraamakuva 8 muodostuu kolmesta samankeskeisestä osakuvasta. Ylärivillä ovat alkuperäiset osakuvat. Alarivin kuvista on poistettu piirtovirheet.



Kuva 8b: Panoraamakuva on tehty liittämällä toisiinsa piirtovirheettömät osakuvat.
Liitos on tehty projisioimalla reunimmaisat osakuvat samalle tasolle keskimmäisen osakuvan kanssa.



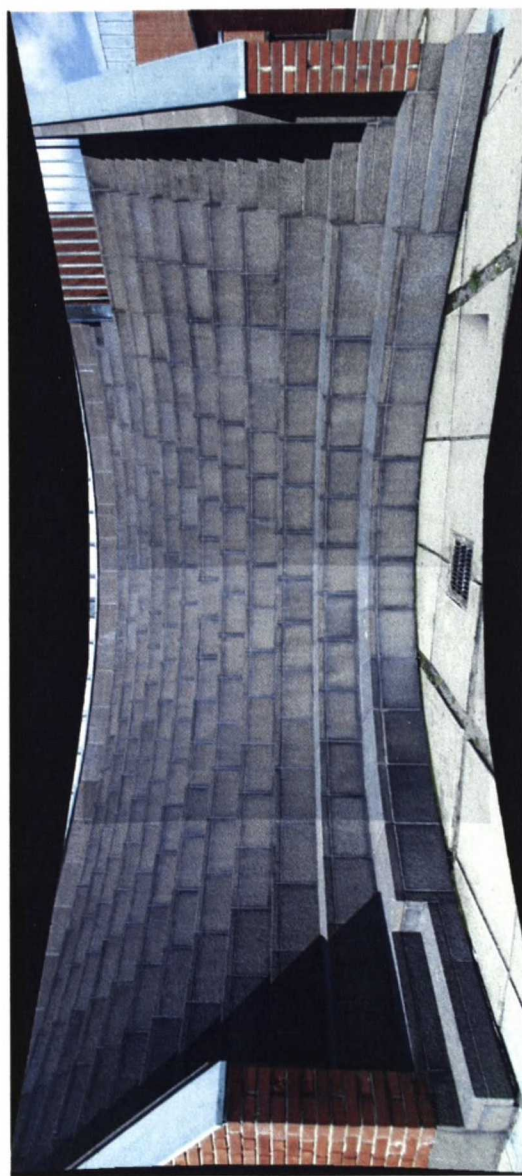
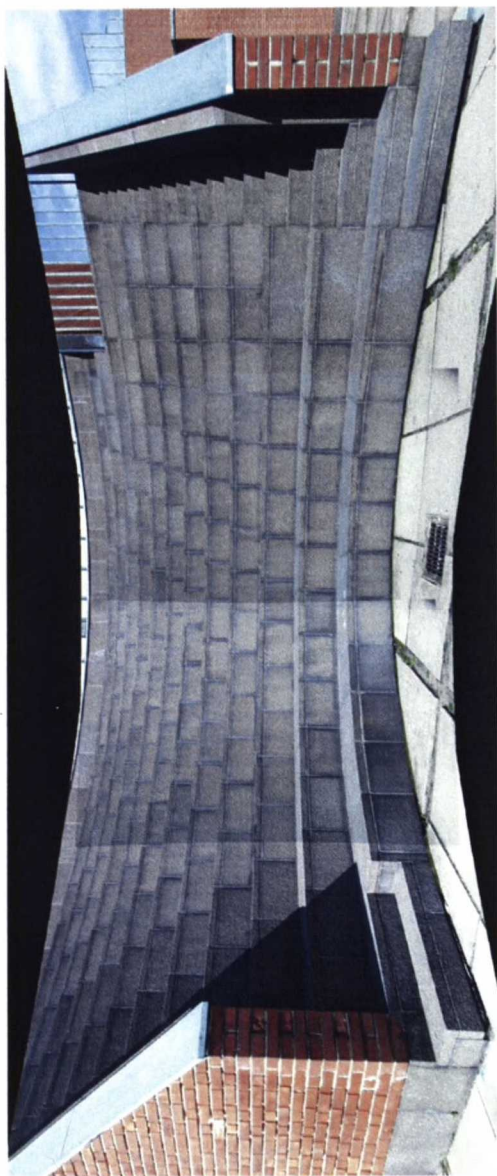
Kuva 8c: Valmis panoraamakuvapari. Kuvista on yhdistämisvaiheen jälkeen leikattu pois ylimääräiset reuna-alueet. Ylhäällä stereoparin vasemmanpuoleinen kuva (5170 x 1000 pikseliä) ja alhaalla oikeanpuoleinen kuva (4707 x 1000 pikseliä).



Kuva 9: Ylhäällä stereoparin
vasemmanpuoleinen kuva
(3543 x 1309 pikseliä) ja
alhaalla oikeanpuoleinen
kuva (3545 x 1302 pikseliä).



Näissä panoraamakuvissa
oleva alue näkyy myös
kuvaparilla 8.



Kuva 10: Ylhäällä stereoparin
vasemmanpuoleinen kuva (3346 x 1398
pikseliä) ja alhaalla oikeanpuoleinen kuva
(3131 x 1382 pikseliä)

4.2 Stereotyöasema

Digitaalinen stereotyöasema koostuu laitteistosta ja ohjelmistoista, joita tarvitaan digitaalisten kuvien käsittelyyn, mittaamiseen ja stereotarkasteluun.

4.2.1 Laitteisto

Koetyössä käytettiin laitteistoa, johon kuuluu keskusyksikön ja näytön lisäksi stereografiikkakortti, 3D-hiiri ja stereolasit. Stereovaikutelma saadaan aikaan, kun kuva-parin vasenta ja oikeaa kuvaa päivitetään näytölle vuorotellen 120 Hz:n taajuudella. Stereolasien vasen ja oikea linssi muuttuvat samalla taajuudella vuorotellen läpinäkyviksi. Näin käyttäjä näkee vasemmalla silmällä ainoastaan vasemman kuvan ja oikealla oikean kuvan. Kuvien esitystaajuus on tarpeeksi suuri, jotta käyttäjä ei huomaa kuvien vaihtumista, vaan hahmottaa näkemänsä kuvat yhtenäisenä stereomallina.

4.2.2 Ohjelmisto

Kuvien orientointeihin käytettiin Intergraphin ImageStation Digital Mensuration –ohjelmaa. Ohjelma on alunperin suunniteltu mittakameralla otettujen ilmakuvien orientointiin, mutta soveltamalla sillä onnistuttiin käsittelemään myös digitaalkameralla otettuja maapanoraamakuvia. Orientointien lisäksi ohjelmaa käytettiin kuvapyramidien sekä epipolaarikuvien muodostamiseen.

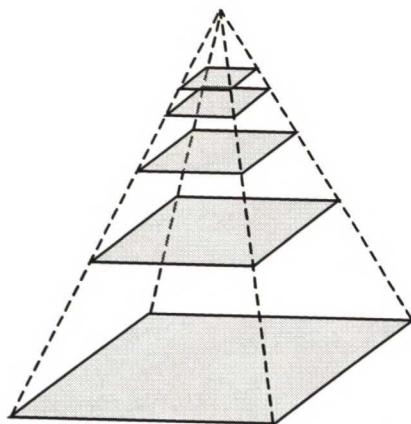
Orientoidut kuvat siirrettiin Intergraphin ImageStation Stereo Display –ohjelmaan, joka on tarkoitettu stereomallien katseluun ja käsittelyyn. Sillä voidaan esimerkiksi muokata kuvien histogrammeja ja tehdä kuville erilaisia suodatuksia.

Stereomallin mittaamiseen käytettiin Intergraphin ImageStation DTM Collection –ohjelmaa. Sillä voidaan mitata korkeuspisteitä ja erilaisia taiteviivoja sekä muodostaa mittauksista korkeusmalleja.

4.3 Työn kulku

4.3.1 Kuvapyramidin muodostus

Jokaisesta kuvasta muodostettiin kuvapyramidi. Kuvapyramidi muodostuu useista kuvatasoista, joista alimpana on alkuperäinen kuva. Ylemmille tasoille siirryttäessä kuvien resoluutiota ja kokoa pienennetään näytteistämällä edelliseen tason kuvaa (Kuva 11). Kuvapyramidin käyttö nopeuttaa kuvan päivittymistä näytölle, koska aina ei tarvitse ladata näkyviin täyden resoluution kuvaa.



Kuva 11: Kuvapyramidi

4.3.2 Orientoinnit

Kuvapari voidaan orientoida maastokoordinaatistoon joko keskinäisen ja absoluuttisen orientoinnin kautta tai suoraan ulkoisella orientoinnilla. Molempia tapoja kokeiltiin kaikille kuvapareille, jotta voitiin selvittää onko orientointien lopputuloksissa eroja.

Amfikuvapari (Kuva 10) orientoitiin maastoon tukipisteiden avulla. Jordaniakuvien (Kuvat 8 ja 9) orientointiin käytettiin maastosta takymetrillä mitattuja piirteitä, koska kuvilla ei ollut tukipisteitä.

Sisäinen orientointi

Panoraamakuvien sisäiset orientoinnit ratkaistiin jo kuvien yhdistämisvaiheessa. Kuvien pääpisteiden koordinaatit ja kameravakiot siis tunnettiin eikä kuvilla ollut piirtovirheitä.

Sisäiset orientoinnit oli kuitenkin suoritettava myös DigitalMensuration –ohjelmassa, koska ohjelma vaatii sisäisen orientoinnin suorittamista ennen kuin sillä voidaan tehdä muita orientointeja. Sisäistä orientointia varten kuvilta olisi pitänyt mitata reunamerkit. Koska koetyön kuvissa ei ole reunamerkkejä, laskettiin tunnetun pääpisteen avulla kuvien reunoihin paikat, joissa reunamerkit voisivat sijaita. Jokaiselle kuvalle laskettiin neljä reunamerkin paikkaa, jonka jälkeen paikat voitiin mitata kuvilta ja sisäinen orientointi saatiin laskettua.

Keskinäinen orientointi

Keskinäinen orientointi tehtiin mittaamalla kuvapareilta yhteisiä pisteitä. Orientointi onnistui hyvin amfikuvalle, mutta molempien jordaniakuvien kanssa oli ongelmia. Ne aiheutuivat maakuvien poikkeavasta kuvausgeometriasta ilmakuviin verrattuna. Ongelmat ilmenivät siten, ettei käytetty ohjelma enää muutaman mitatun pisteen jälkeen pystynyt laskemaan orientointia vaan jumiutui. Muuttamalla pisteiden paikkoja ja mittausjärjestystä sopivasti orientoinnit saatiin lopulta onnistumaan. Jos orientoinnin jäännösvirheestä tuli hyvin pieni, syntyi uusia ongelmia. Kuvatiedostot eivät enää auenneet absoluuttista orientointia varten. Myöskään keskinäistä orientointia ei tämän jälkeen voinut enää muuttaa.

Keskinäinen orientointi jordaniakuvaparille 8 saatiin onnistumaan, kun orientointipisteitä mitattiin ainoastaan kuvien keskikohdasta eikä kuutta kappaletta enempää. Tästä syystä orientoinnin tarkkuus kuvien reunoilla jäi keskikohtaa heikommaksi. Jordanikuvaparilta 9 pisteitä onnistuttiin mittaamaan ympäri kuvaa mutta jälleen vain kuusi kappaletta.

Absoluuttinen orientointi

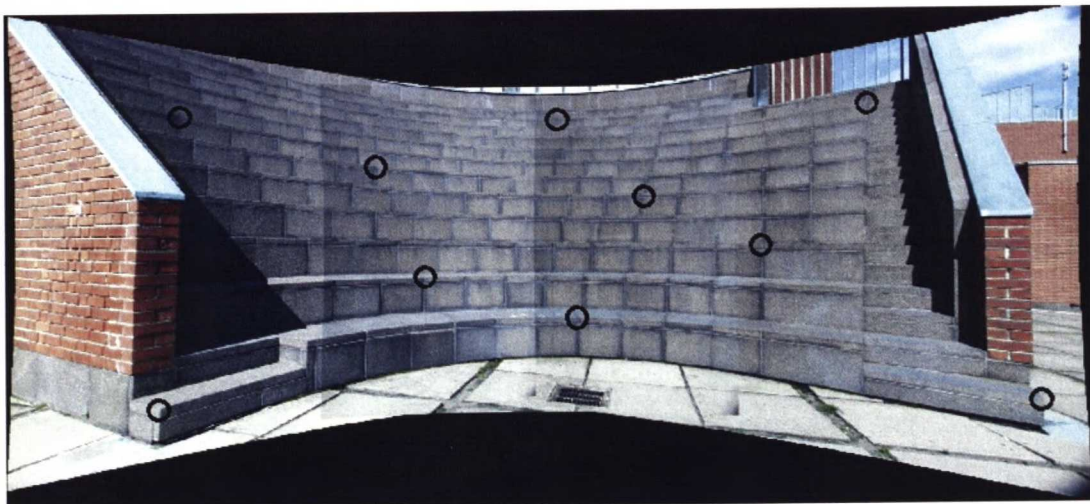
Absoluuttista orientointia varten stereomalleilta mitattiin maastokoordinaateiltaan tunnettuja pisteitä.

Amfikuvalla tukipisteet olivat kivilaattojen nurkkiin mitattuja takymetripisteitä (Kuva 12). Ne sijaitsivat tasaisesti koko kuvan alueella ja niiden paikat oli helppo mitata tarkasti stereomallilta.

Jordaniakuvilla varsinaisia tukipisteitä ei sen sijaan ollut, vaan tukitietona käytettiin maastosta takymetrillä mitattuja piirteitä kuten kuvilla näkyvää tietä ja taiteviivoja (Kuva 13). Piirteet koostuivat yksittäisistä tunnetuista pisteistä, jotka oli havainnollisuuden vuoksi yhdistetty yhtenäisiksi viivoiksi. Piirteet eivät kattaneet kuva-alaa tasaisesti, vaan esimerkiksi kuvien etualoilla piirteitä oli hyvin vähän. Piirteiden sijainteja ei ollut merkitty maastoon, mutta stereomallia ja piirretietoja vertaamalla mallilta voitiin tunnistaa muutamia piirteitä. Tunnistetuista piirteistä valittiin sellaiset yksittäiset pisteet, joiden paikat pystyttiin mahdollisimman tarkasti osoittamaan mallilta. Pisteet eivät yleensä sijainneet kivien kulmissa tai muissa tarkasti paikannettavissa kohdissa vaan esimerkiksi tien keskellä tai ojan mutkassa. Tämä vaikeutti pisteiden mittaamista täsmälleen oikeisiin kohtiin. Piirteiden avulla saatiin kuitenkin aikaan karkea absoluuttinen orientointi. Kun piirretiedot orientoinnin jälkeen projisoitiin stereomallille, ne sijoittuivat lähelle oikeita paikkojaan. Tämän jälkeen mallilta voitiin tunnistaa lisää piirteitä, joiden avulla tarkennettiin orientointia. Tarkentamista jatkettiin kunnes orientointi ei enää näyttänyt parantuvan.

Ulkoinen orientointi

Amfikuvaparille tehtiin ulkoinen orientointi mittaamalta molemmilta kuvilta erikseen tukipisteiden koordinaatteja. Jordaniakuvien ulkoisessa orientoinnissa käytettiin jälleen takymetripiirteitä. Koska piirteitä oli vaikea tunnistaa kaksikulotteisilta kuvilta, käytettiin hyväksi samoja piirteitä, jotka oli aikaisemmin tunnistettu absoluuttista orientointia varten keskinäisen orientoinnin malleilta.



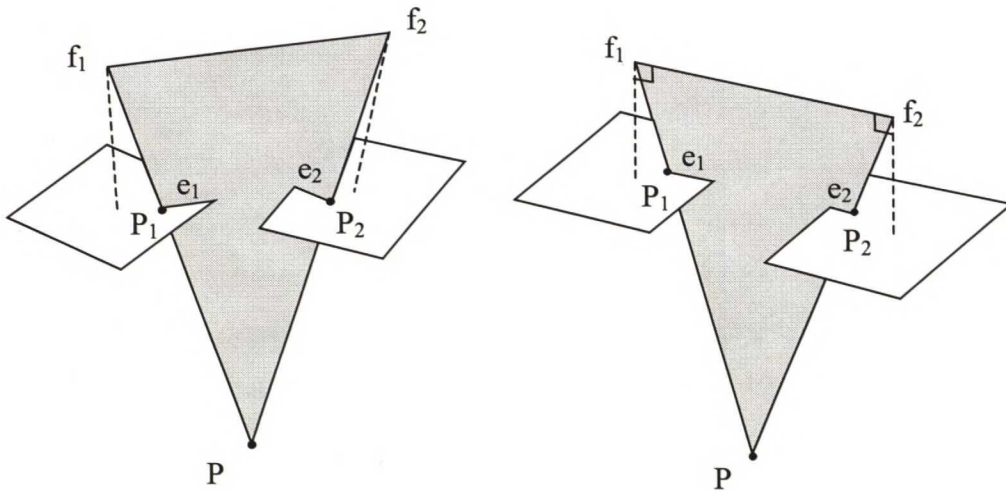
Kuva 12: Amfikuvan orientoinnissa käytettyjen tukipisteiden paikat näkyvät kuvassa mustina renkaina. Pisteet sijaitsevat tasaisesti koko kuvan alueella ja niiden tarkat paikat tunnetaan.



Kuva 13: Jordaniakuvien orientoinneissa käytetyt takymetripiirteet näkyvät kuvassa mustina viivoina. Ne eivät kata kuva-aluetta tasaisesti, vaan esimerkiksi kuvan etualalla piirteitä on hyvin vähän. Yksittäisen pisteen mittaaminen täsmälleen oikeaan kohtaan mallilla tai kuvalla on vaikeaa, koska kuvat on otettu kaukaa eikä pisteiden sijainteja ole merkitty maastoon. Orientoinneissa käytettyjen tukipisteiden tarkemmat sijainnit selviävät liitteestä 2.

4.3.3 Epipolaarikuvien muodostus

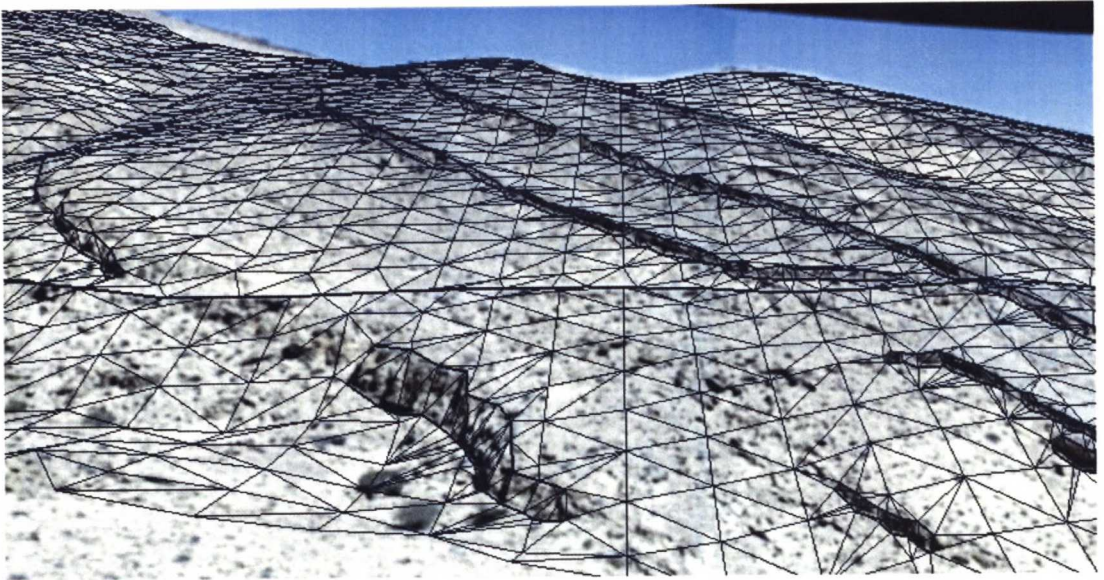
Kun orientoinnit oli suoritettu, kuvapareista muodostettiin epipolaarikuvat. Epipolaarikuvat ovat normaaliasentoon oikaistuja stereokuvapareja, jotka muodostetaan alkuperäisistä kuvista uudelleen näytteistämällä. Normaaliasentoisen stereokuvaparin kuvausakselit ovat keskenään yhdensuuntaiset ja kohtisuorat kantaa vastaan (Schwidersky, 1978) (Kuva 14). Epipolaarikuvaparien välillä ei ole lainkaan y-parallaksia, joten niitä käyttämällä saadaan aikaan optimaalinen stereonäkymä.



Kuva 14: Vasemmalla kuvapari alkuperäisessä asennossaan, oikealla normaaliasentoon oikaistu kuvapari. Oikaistuissa kuvissa epipolaarisuorat e_1 ja e_2 ovat pikselirivien suuntaiset. (Schenk, 1999)

4.3.4 Korkeusmallin mittaaminen

Jordaniakuvien muodostamilta stereomalleilta mitattiin korkeusmallit. Korkeuspisteitä mitattiin neljän metrin välein ja lisäksi mitattiin maaston taiteviivoja. Pisteistä ja viivoista muodostettiin kolmioverkkomallit (Kuva 15). Tasavälinen korkeuspisteverkko näyttää kuvan etualalla harvemmalta, koska kohde on lähempänä. Tämän vuoksi kuvan etualalta mitatut pisteet ovat myös tarkempia kuin takaa mitatut. Koska panoraamakuvien oikea ja vasen reuna näyttivät epäteräviltä, korkeuspisteitä ei mitattu aivan stereomallin reunoilta. Mittamerkin kohdistaminen maanpinnalle epäterävällä mallilla oli niin vaikeaa, ettei tulos olisi ollut luotettava.



Kuva 15: Osa korkeusmallia projisoituna jordaniakuvalle 9.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Kun koetyö oli suoritettu, vertailtiin orientointien onnistumista ja arvioitiin korkeusmallien tarkkuutta. Lisäksi mietittiin, mitkä asiat tarkkuuksiin vaikuttavat.

5.1 Orientointien tarkkuus

Orientointien tarkkuuteen vaikuttavat kuvien ja tukipisteiden ominaisuudet. Jos kuva on otettu läheltä kohdetta, siitä on helpompi erottaa yksityiskohtia ja mitata pisteitä. Orientointipisteiden olisi sijaittava tasaisesti koko kuvan alueella ja mieluiten sellaisissa kohdissa, joissa pisteiden sijainnit pystytään tarkasti osoittamaan. Näiden vaatimusten osalta amfi- ja jordaniakuvat poikkesivat toisistaan.

Orientointien tarkkuuksia arvioitiin erilaisten tunnuslukujen avulla, joita orientointiohjelma laskee. Lisäksi amfikuvan kohdalla tutkittiin, kuinka hyvin orientoinnin tuloksena lasketut kuvanottopaikat vastaavat tunnettuja paikkoja. Jordaniakuvien avulla tarkasteltiin, kuinka hyvin takymetripiirteet sijoittuvat paikoilleen, kun ne projisoidaan stereomallille.

5.1.1 Tunnusluvut

Käytetty orientointiohjelma laskee tunnusluvut automaattisesti orientointien yhteydessä. Ohjelmassa ei kuitenkaan kerrota, millä tavoin laskenta tarkalleen tapahtuu, joten asia jää käyttäjän pääteltäväksi.

Jäännösvirhe

Jokaisen orientoinnin jälkeen orientointipisteille lasketaan jäännösvirheet. Jäännösvirhe kertoo, kuinka paljon pisteen mitatut koordinaatit poikkeavat sille tasoituksen aikana lasketuista koordinaateista. Taulukossa 1 esitetään kultakin mallilta iteseisarvoltaan suurimmat eri orientoinneissa esiintyvät jäännösvirheet. Absoluuttisen ja ulkoisen orientoinnin kaikkien pisteiden tarkat jäännösvirhearvot ja jäännösvirheiden kuvaajat löytyvät liitteestä 3.

Taulukko 1: Suurimmat orientoinneissa esiintyvät jäännösvirheet

Kuva 8

keskinäinen orientointi, px
absoluuttinen orientointi, m
ulkoinen orientointi, vasen kuva, m
ulkoinen orientointi, oikea kuva, m

x	y	X	Y	Z
0.001	0.15	-	-	-
-	-	3.7	4.78	-1.81
-	-	0.78	-0.36	0.85
-	-	-0.59	-0.61	0.54

Kuva 9

keskinäinen orientointi, px
absoluuttinen orientointi, m
ulkoinen orientointi, vasen kuva, m
ulkoinen orientointi, oikea kuva, m

x	y	X	Y	Z
0.05	1.2	-	-	-
-	-	6.29	7.331	1.64
-	-	-0.68	0.52	1.01
-	-	-0.6	0.42	0.85

Kuva 10

keskinäinen orientointi, px
absoluuttinen orientointi, m
ulkoinen orientointi, vasen kuva, m
ulkoinen orientointi, oikea kuva, m

x	y	X	Y	Z
0.11	1.53	-	-	-
-	-	-0.27	0.18	0.14
-	-	-0.03	0.02	0.04
-	-	-0.03	-0.03	-0.04

Taulukosta 1 nähdään, ettei minkään koordinaatin tarkkuus poikkea huomattavasti muista. Jordaniakuvan 8 keskinäisen orientoinnin pisteitä on mitattu ainoastaan kuvien keskikohdilta. Tämä saattaa pienentää jäännösvirheitä verrattuna tilanteeseen, jossa pisteitä olisi mitattu myös kuvien reunoilta.

Ulkoisen orientoinnin pisteet ovat jokaisella kuvalla tarkempia kuin absoluuttisen orientoinnin pisteet. Syynä tähän on se, että pisteet on mitattu erikseen kummaltakin kuvalta eikä valmiilta mallilta, joten keskinäisen orientoinnin jäännösvirheet eivät ole aiheuttaneet pisteisiin epätarkkuutta.

Mittaustarkkuutta kuvaparien välillä ei voida suoraan verrata jäännösvirheiden avulla, koska kuvien mittakaavat eroavat toisistaan paljon. Mittakaava muuttuu myös yksittäisellä kuvalla siten, että se on kuvan etualalla paljon suurempi kuin taka-alalla. Tämän takia jäännösvirheitä on myös hankala suhteuttaa kuvien mittakaavaan. Keskimäärin kuvien leveydet ovat n. 350 m, 180 m ja 12 m järjestyksessä kuville 8, 9 ja 10.

Jäännösvirheen neliöllinen keskiarvo

Jäännösvirheistä lasketaan neliölliset keskiarvot (Root Mean Square, RMS), joilla kuvataan residuaalien keskihajontaa. Neliöllinen keskiarvo lasketaan kaavalla 17 ja taulukossa 3 on esitetty laskennan tulokset.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n res_i^2}{n}}$$

(17)

Kaavassa 17:

res = jäännösvirhe (residuaali)

n = havaintojen lukumäärä

Taulukko 2: Jäännösvirheiden neliölliset keskiarvot

Kuva 8

Keskinäinen orientointi, px
Absoluuttinen orientointi, m
Ulkoinen orientointi, vasen kuva, m
Ulkoinen orientointi, oikea kuva, m

x	y	X	Y	Z
0.001	0.07	-	-	-
-	-	1.75	1.85	0.78
-	-	0.42	0.19	0.3
-	-	0.33	0.22	0.25

Kuva 9

Keskinäinen orientointi, px
Absoluuttinen orientointi, m
Ulkoinen orientointi, vasen kuva, m
Ulkoinen orientointi, oikea kuva, m

x	y	X	Y	Z
0.04	0.7	-	-	-
-	-	3.7	2.97	0.65
-	-	0.45	0.25	0.41
-	-	0.39	0.23	0.41

Kuva 10

Keskinäinen orientointi, px
Absoluuttinen orientointi, m
Ulkoinen orientointi, vasen kuva, m
Ulkoinen orientointi, oikea kuva, m

x	y	X	Y	Z
0.04	0.72	-	-	-
-	-	0.14	0.09	0.06
-	-	0.02	0.02	0.02
-	-	0.01	0.01	0.02

Sigma

Jäännösvirhevektoreiden avulla lasketaan sigma, jolla kuvataan orientoinnin keskihajontaa. Sen avulla voidaan siis arvioida koko orientoinnin tarkkuutta. Sigma lasketaan kaavalla 18.

$$\sigma = \sqrt{\frac{v^T * W * v}{r}} * a \text{ priori sigma} \tag{18}$$

Kaavassa 18:
v = jäännösvirhevektori
W = painomatriisi
r = ylimääritys eli havaintojen määrä – tuntemattomien määrä
a priori sigma = kuvahavaintojen keskihajonta = 0.1
(Z/I Imaging, 2001)

Taulukossa 3 on koetöissä esiintyvät sigma-arvot:

Taulukko 3: Sigmat kuville 8, 9 ja 10.

	8	9	10
keskinäinen orientointi, px	0.23	2.5	2.51
absoluuttinen orientointi, m	80.3	164.2	5.8
ulkoinen orientointi, vasen kuva, m	22.5	27.8	1.4
ulkoinen orientointi, oikea kuva, m	19.0	25.7	1.3

Keskinäinen orientointi näyttää tuottavan tarkan mallin jokaisesta kuvaparista. Jordaniakuvaparin 8 keskinäisen orientoinnin sigma-arvo ei kuitenkaan ole täysin vertailukelpoinen kahteen muuhun kuvapariin verrattuna, koska orientointipisteitä on mitattu ainoastaan kuvien keskeltä.

Absoluuttisen orientoinnin sigmat jordaniakuvilla 8 ja 9 ovat niin suuria, ettei orientointeja voida pitää hyvinä. Näin ollen näitä malleja ei myöskään kannata käyttää tarkkoihin mittauksiin. Ulkoisen orientoinnin sigma on jokaisella kuvalla selvästi pienempi kuin absoluuttisen orientoinnin sigma. Tämän perusteella näyttää siltä, että kuvat saadaan orientoitua maastokoordinaatistoon tarkemmin ulkoisella orientoinnilla kuin keskinäisen ja absoluuttisen orientoinnin kautta. Ulkoisessa orientoinnissa molemmat kuvat orientoidaan suoraan maastokoordinaatteihin, jolloin mallikoordinaattien mahdolliset virheet eivät pääse vaikuttamaan orientointiin. Keskinäisesti orientoituilla kuvilla varsinainen stereomalli voi kuitenkin olla parempi kuin ulkoisesti orientoituilla kuvilla.

Muita tunnuslukuja

Käytetty orientointiohjelma laskee edellä esitettyjen tunnuslukujen lisäksi standardisoidut jäännösvirheet, joita voidaan käyttää karkeiden virheiden etsimiseen havainnoista sekä keskinäisen orientoinnin jäännösparallaksin. Nämä löytyvät liitteestä 3.

5.1.2 Kuvanottopaikat

Absoluuttisen ja ulkoisen orientoinnin tuloksena saadaan kuvanottopaikkojen koordinaatit. Amfikuvaparin kuvanottopaikat tunnettiin, joten niitä verrattiin orientoinneissa laskettuihin koordinaatteihin. Taulukosta 4 selviää, kuinka paljon tunnetut koordinaatit poikkeavat lasketuista koordinaateista absoluuttisen ja ulkoisen orientoinnin jälkeen. Luvut on saatu vähentämällä tunnetuista koordinaateista lasketut koordinaatit.

Taulukko 4: Tunnetut kuvanottopaikat – lasketut kuvanottopaikat

Absoluuttinen orientointi

	Δx	Δy	Δz
vasen kuva, m	-0.287	-0.213	0.306
oikea kuva, m	-0.292	-0.113	0.34

Ulkoinen orientointi

	Δx	Δy	Δz
vasen kuva, m	-0.017	-0.115	-0.131
oikea kuva, m	-0.053	0.031	0.148

Taulukoita vertaamalla voidaan huomata, että ulkoisessa orientoinnissa lasketut kuvienottopaikat ovat lähempänä todellisuutta kuin absoluuttisessa orientoinnissa lasketut. Suurimmat virheet molemmissa orientoinneissa ovat z-koordinaateissa. Tämänkin perusteella ulkoista orientointia voidaan pitää absoluuttista orientointia luotettavampana.

Jordaniakuvien kuvanottopaikkojen koordinaatteja ei tunneta, mutta vertailun vuoksi laskettiin kuinka paljon absoluuttisessa orientoinnissa lasketut paikat eroavat ulkoisessa orientoinnissa lasketuista paikoista. Erot kuvalla 7 ovat n. 2 m X- ja Y-koordinaatille sekä n. 3 m Z-koordinaatille. Kuvalla 8 vastaavat luvut ovat n. 0.5 m ja n. 1 m. Eli mitä kauempaa kuva on otettu, sitä suuremmiksi erot näyttävät kasvavan.

5.1.3 Piirteet

Jordaniakuvien orientointien tarkkuutta voidaan visuaalisesti tutkia piirretietojen avulla. Kun absoluuttinen tai ulkoinen orientointi on suoritettu, piirretietojen pitäisi asettua paikoilleen, kun ne projisoidaan stereomallille. Absoluuttisen orientoinnin malleilla piirteet kuitenkin poikkeavat selvästi oikeilta paikoiltaan. Ulkoisen orientoinnin malleilla piirteet asettuvat paremmin kohdalleen.

Piirteet poikkeavat oikeilta paikoiltaan yhtä paljon kuin samaan kohtaan mitatut tukipisteet eli pisteiden jäännösvirheiden verran ja ne ovat suunnilleen yhtä suuria jokaisen koordinaattiakselin suuntaan.

5.2 Korkeusmallin tarkkuus

Korkeusmallien mittaamiseen käytettiin ulkoisesti orientoitujen jordaniakuvien muodostamia stereomalleja, koska ulkoinen orientointi osoittautui absoluuttista orientointia tarkemmaksi. Orientoinnin tarkkuus vaikuttaa suoraan korkeusmallin tarkkuuteen, joten systemaattinen mittausvirhe oli samaa suuruusluokkaa kuin orientoinnin jäännösvirheet eripuolilla stereomallia.

Lisäksi mittaustarkkuuteen vaikuttaa kohteen etäisyys kuvauspaikasta. Mitä lähempänä kohde on, sitä enemmän siitä voidaan erottaa yksityiskohtia. Kuvien etualalta pystyttiin siis mittaamaan kohdetta tarkemmin kuin taka-alalta. Myös katvealueet aiheuttivat korkeusmalliin epätarkkuutta, koska niitä ei pystytty mittaamaan eikä rajaamaan tarkasti mallin ulkopuolelle.

Kun molemmat korkeusmallit projisoitiin samaan kuvaan, voitiin havaita, että malleissa oli virhettä. Orientoinnin epätarkkuuden takia korkeusmallit eivät olleet täsmälleen samassa koordinaatistossa, joten ne eivät asettuneet peittoalueeltaan päällekkäin. Keskimäärin mallien välille jäi korkeuseroa n. 0.8 m.

5.3 Virhelähteet ja tarkkuuden parantaminen

Jatkossa pitäisi tutkia, mistä mallien virheet aiheutuvat. Johtuvatko ne panoraamakuvien sisäisestä vai ulkoisesta orientoinnista.

Virhe on voinut syntyä jo kuvaamistilanteessa. Jos kameran projektiokeskus on liikkunut kuvien oton välillä, osakuvat eivät olekaan täysin samankeskisiä. Myös piirtovirheiden poistossa tai osakuvien yhdistämisvaiheessa on voinut olla epätarkkuutta, jolloin panoraamakuvat eivät täysin vastaisikaan keskusprojektion kuvia. Syynä voi olla myös absoluuttisen ja ulkoisen orientoinnin epätarkkuus. Tukipisteitä ei ehkä ole onnistuttu mittaamaan tarpeeksi tarkasti ja kattavasti koko stereomallin tai kuvan alueelta.

Jos virheitä ei saada poistettua, pitäisi keksiä keino, jolla korkeusmallit saadaan samaan koordinaatistoon. Kuville voisi esimerkiksi tehdä blokkitasoituksen ennen korkeusmallien mittaamista.

Koska alueelta on olemassa ilmakuvilta mitattu karkeampi korkeusmalli, yhtenä keinona voisi olla sovittaa panoraamakuvilta mitatut mallit ilmakuvilta mitattuun malliin ja saada ne sitä kautta samaan koordinaatistoon.

6 YHTEENVETO

Diplomityössä on selvitetty, miten maapanoraamakuvien orientointi ja mittaaminen onnistuu digitaalisessa stereotyöasemassa.

Ensin on esitetty menetelmä, jolla panoroituja mittakuvia voidaan muodostaa samankeskisistä osakuvista. Menetelmässä osakuvat pyritään liittämään toisiinsa siten, että yhden alkuperäisen osakuvan keskusprojektio säilyy yhdistelmäkuvasa. Liitos tehdään projisoimalla osakuvat yhteiselle tasolle projektiivisellä muunnoksella.

Koetyössä käytettiin kolmea osakuvista muodostettua panoraamakuvaparia. Kaikki kuvaparit orientoitiin maastokoordinaatistoon ensin keskinäisen ja absoluuttisen orientoinnin kautta ja sen jälkeen ulkoisella orientoinnilla. Kahdella kuvaparilla ei ollut lainkaan tukipisteitä, vaan orientoinneissa käytettiin maastosta takymetrillä mitattuja piirretietoja.

Koetöiden perusteella selvisi, että panoraamakuvien orientointi maastokoordinaatistoon onnistuu piirretietojen avulla. Orientoinnista saataisi tulla tarkempi, jos piirretietojen sijaan käytettäisiin tukipisteitä. Tukipisteiden täsmällinen paikka on helpompi löytää ja mitata kuvilta kuin viivamaisten piirretietojen. Piirretietojen käytön hyvänä puolena on, että tällöin maastoon ei tarvitse merkitä tukipisteiden paikkoja.

Ulkoinen orientointi osoittautui kaikilla kuvilla tarkemmaksi kuin absoluuttinen orientointi. Sigma-arvot olivat huomattavasti pienempiä ja takymetripiirteet asettuivat kuvilla paremmin kohdalleen ulkoisen orientoinnin jälkeen. Lisäksi ohjelman laskemat kuvanottopaikat olivat lähempänä tunnettuja arvoja kuin absoluuttisen orientoinnin tuloksena.

Koetyössä panoraamakuvien orientoinnit tehtiin ilmakuvien käsittelyyn tarkoitettulla ohjelmalla. Maapanoraamakuvien poikkeava kuvausgeometria ilmakuviin verrattuna aiheutti ongelmia kahdella kuvaparilla. Keskinäisen orientoinnin pisteitä ei voitu mitata tasaisesti ympäri kuvaa eikä niitä voinut mitata kuutta enempää.

Kahdelta ulkoisesti orientoidulta kuvalta mitattiin korkeusmallit. Korkeuspisteitä mitattiin neljän metrin välein ja lisäksi mitattiin maaston taiteviivoja. Pisteistä ja viivoista muodostettiin kolmioverkkomallit. Orientoinnin epätarkkuuden takia etenkin korkeusmallien reuna-alueille tuli vääristymiä. Tästä syystä vierekkäisiltä kuiltä mitattuja malleja ei voitu suoraan liittää yhteen.

Jatkossa pitäisi selvittää, mistä mallien virheet aiheutuvat. Johtuvatko ne panoraamakuvien sisäisestä vai ulkoisesta orientoinnista.

Jos vääristymiä ei saada poistettua, pitäisi keksiä keino, jolla korkeusmallit saadaan samaan koordinaatistoon. Tehtävään voisi käyttää esimerkiksi blokkitasoitusta.

7 LÄHTEET

Alavalkama, I., 2000. Kurssimoniste: TTKK / AML 11020 Kuvausmenetelmät
1000-01 / Panoraamakuvauus

Antipov, I. T. & Kivaev A. I., 1984. Panoramic Photographs in Close Range
Photogrammetry. ISPRS, Vol XXV, Part A5, Comission V, s. 32-38, 1984.

Charles, J. R., 1997. Converting Panoramas to Circular Images and Vice Versa -
Without a Computer! <http://www.eclipsechaser.com/eclink/astrotec/panconv.htm>,
sivulla vierailtu 7.1.2002

Davidhazy, A., 1989. Camera for Conical Peripheral and Panoramic Photography,
Imaging and Photographic Technology Department, School of Photographic Arts and
Sciences, Rochester Institute of Technology, New York
<http://www.rit.edu/~andpph/text-conical-strip.html>, sivulla vierailtu 8.1.2002.

Dersch, H., 1998. Wide Angle Perspective, Technical University of Furtwangen,
Germany,
http://www.fh-furtwangen.de/~dersch/perspective/Wide_Angle_Perspective.html,
sivulla vierailtu 8.1.2002.

Dersch, H., 1999. Spherical Panorama Creation, Technical University of
Furtwangen, Germany,
<http://www.themaestro.net/DSP/Remap/sphformat/Spherical.html>, sivulla vierailtu
9.1.2002.

Haggrén, H., 1999. Panoraamakuvien kartoituskäyttö - unta vai kuvien huumaa?,
Maankäyttö, Vol. 108, nro 1, s. 13-15

Haggrén, H., 2001. Kurssilta: fotogrammetrian perusteet, luennosta:
fotogrammetrinen mittausprosessi,
<http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/7/7.html#Orientoinnit>, sivulla vierailtu
26.9.2001

Haggrén, H., 2000. Kurssilta fotogrammetrinen kartoitus, luennosta:
kolmiontinhavainnot
<http://foto.hut.fi/opetus/220/luennot/3/3.html#Kuvausvirheet>, sivulla vierailtu
20.9.2001

Inkilä, K., 1999. Luentomoniste: Pienimmän neliösumman estimointi

Kraus, K., 1993. Photogrammetry, Vol 1 Fundamentals and standard processes,
Bonn Dümmler, 397 sivua.

Lampinen, R., 1988. Tekniikan ja kuvaajan yhteistyötä: Ympyräpanoraama,
Tekniikan Maailma, Vol. 44, nro 2, s. 66-67.

Lunar and Planetary Institute, 2001,
<http://www.lpi.usra.edu/expmoon/Apollo17/Apollo17.html>, sivulla vierailtu
21.1.2002

Moffitt, F. & Mikhail, E., 1980. Photogrammetry, 3. ed, New York, Harper & Row,
648 sivua

Nasa, 2001, <http://mpfwww.jpl.nasa.gov/MPF/>, sivulla vierailtu 21.1.2002

Panoptic Vision, 2001.
<http://www.panopticvision.com/technology/imagingconcepts.htm>, sivulla vierailtu
8.1.2002

Pöntinen, P., 2000. On the Creation of Panoramic Images from Image Sequences, (Panoraamakuvien tuottaminen kuvasekvensseistä), lisensiaattityö, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, Maanmittausosasto, Teknillinen korkeakoulu.

Schenk, T., 1999. Digital Photogrammetry, Vol 1 Background, fundamentals, automatic orientation procedures, Laurelville (OH), TerraScience, 428 sivua

Schwidefsky, K. & Ackermann, F., 1978. Fotogrammetria, Otaniemi, Otakustantamo, 384 sivua

Shum, H. & Han, M. & Szeliski, R., 1998. Interactive construction of 3-d models from panoramic mosaics. In CVPR98, s. 427-433, 1998.

Stern, S., 2001. Panorama Cameras, <http://www.cirkutpanorama.com/cameras.html>, sivulla vierailtu 7.1.2002.

Z/I Imaging, 2001. Z/I Imaging Corporation, ohjelmistojen tukipalvelu, Alabama, USA

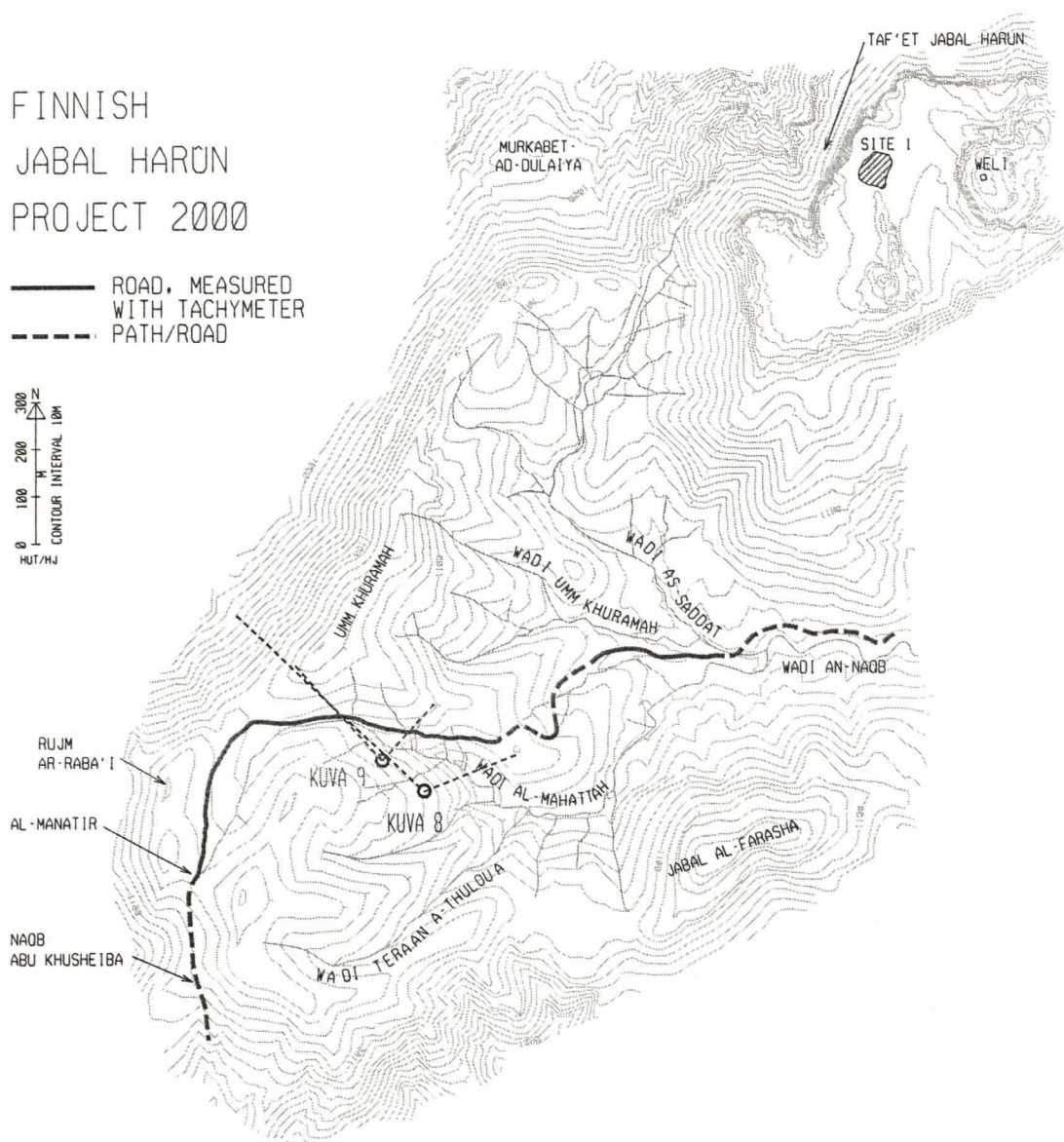
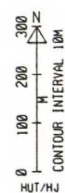
LIITE 1: JABAL HAROUN KARTTA

Kartalle on merkitty stereokuvaparien 8 ja 9 kuvauspaikat sekä -suunnat.

JORDANIAKUVIEN 8 JA 9 KUVAUSPAIKAT
SEKÄ ALUEET, JOTKA KUVAT KATTAVAT.

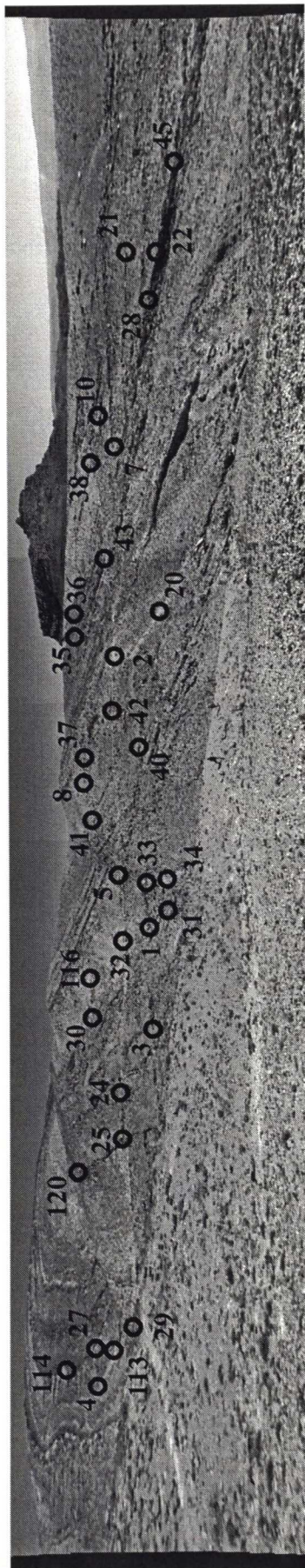
FINNISH
JABAL HARUN
PROJECT 2000

— ROAD, MEASURED
WITH TACHYMETER
- - - PATH/ROAD

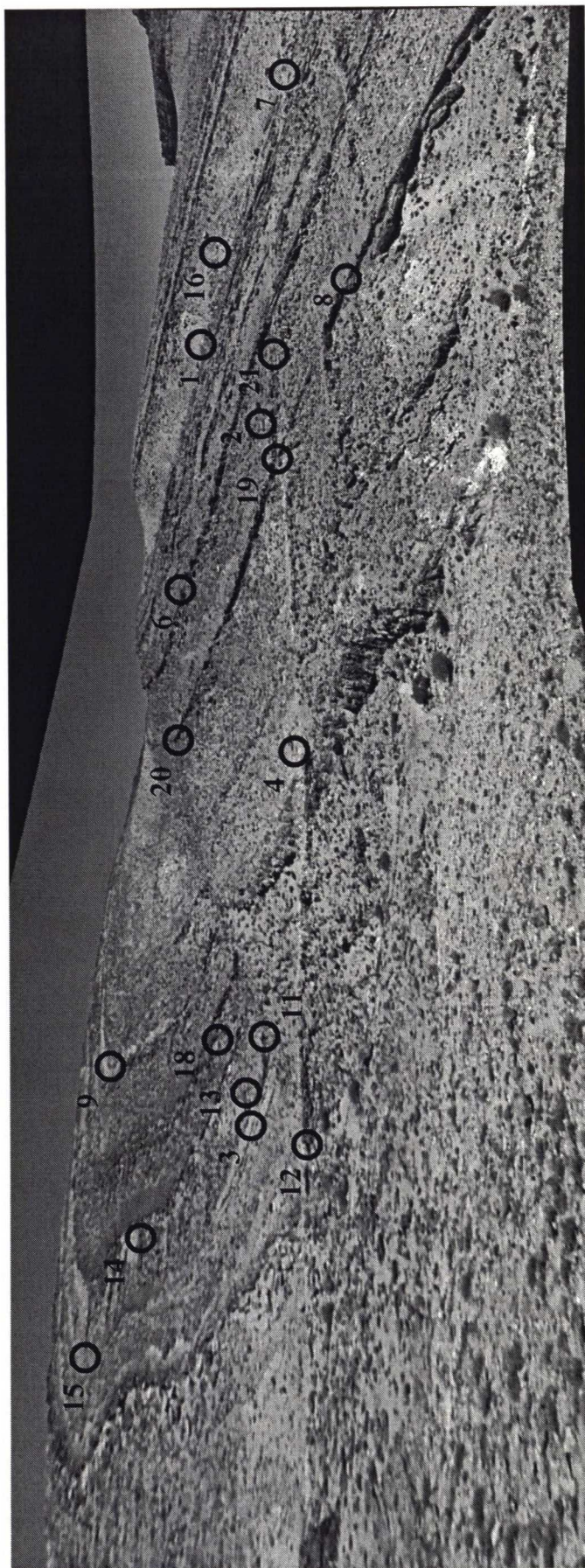


LIITE 2: TUKIPISTEIDEN PAIKAT KUVILLA

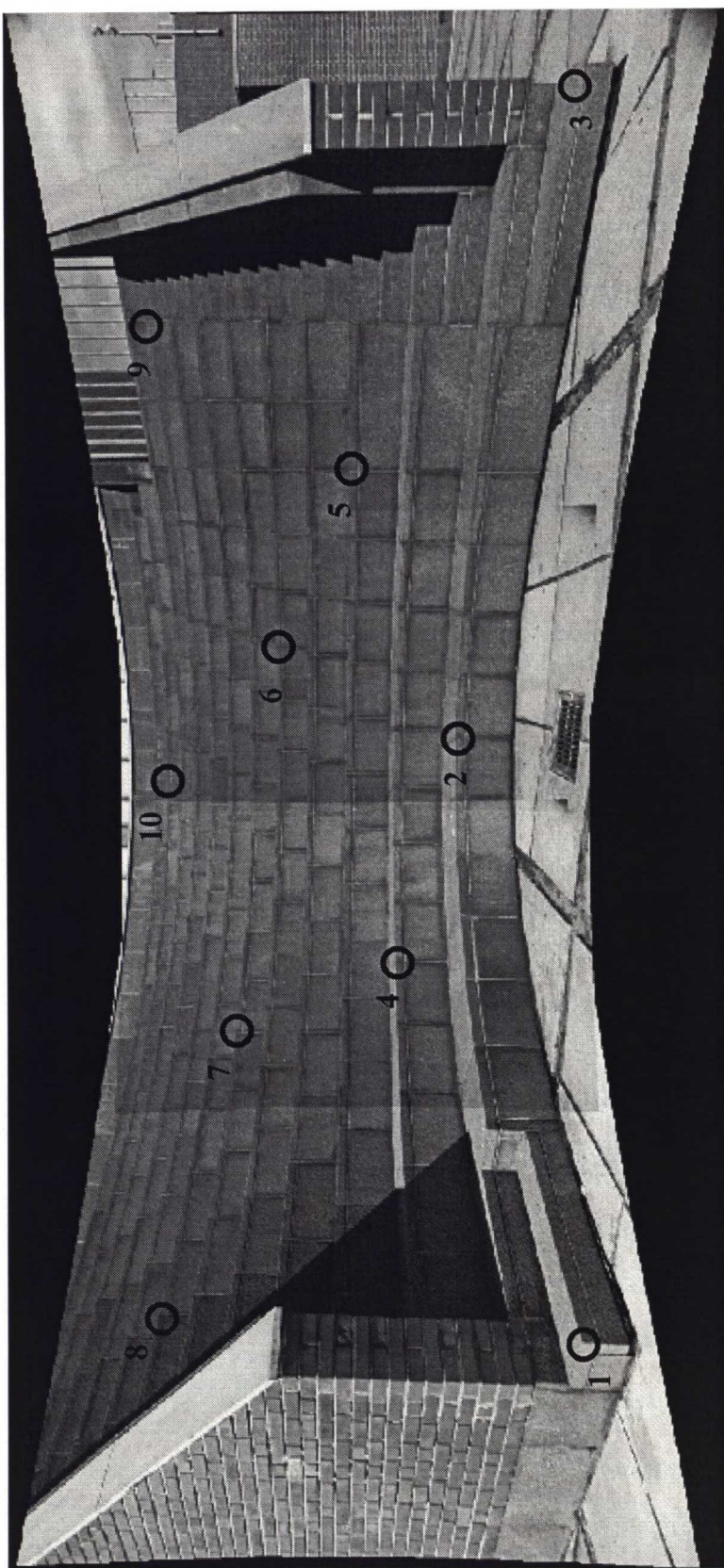
Panoraamakuville on merkitty absoluuttisessa ja ulkoisessa orientoinneissa käytettyjen tukipisteiden paikat. Kaikkia kuville merkittyjä tukipisteitä ei välttämättä ole käytetty molemmissa orientoinneissa. Kussakin orientoinnissa käytettyjen pisteiden numerot ja mittaustarkkuudet selviävät liitteen 3 taulukoista.



Jordaniakuva 8 absoluuttisessa ja ulkoisessa orientoinnissa käytettyjä tukipisteitä



Jordaniakuvan 9 absoluutisessa ja ulkoisessa orientoinnissa käytettyjä tukipisteitä



Amfikuva 10 absoluuttisessa ja ulkoisessa orientoinnissa käytetyt tukipisteet

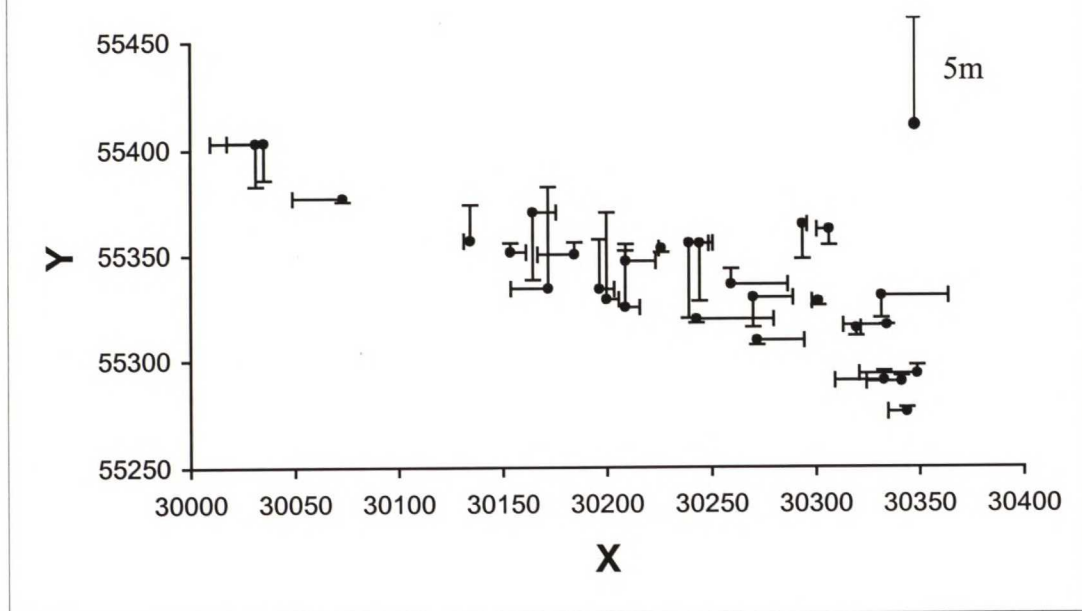
LIITE 3: TUNNUSLUKUJA

Tukipisteiden jäännösvirhekuvat ja -taulukot

Jäännösvirhekuvilla on esitetty absoluuttista ja ulkoista orientointia varten mitatut tukipisteet sekä kunkin pisteen X- ja Y-suuntaiset jäännösvirhevektorit. Jäännösvirhevektoreiden pituudet on kerrottu kymmenellä, koska ulkoisen orientoinnin jäännösvirheet ovat niin pieniä, etteivät vektorit muuten erottuisi kuvilta.

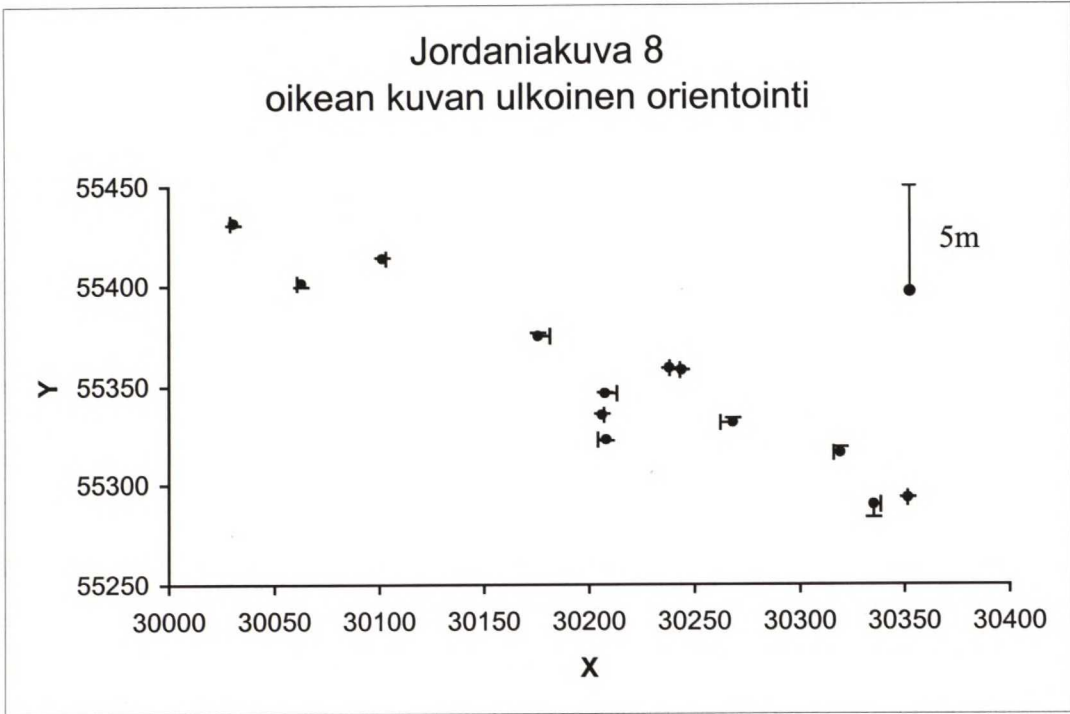
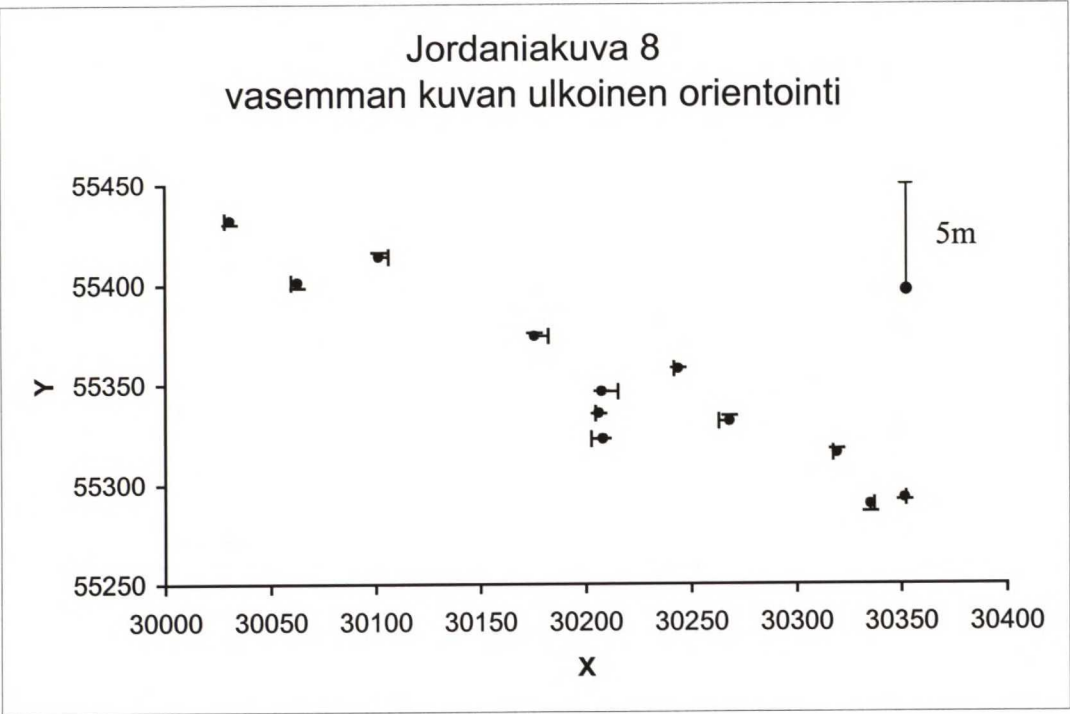
Jäännösvirhetaulukoista selviävät pisteiden tarkat koordinaatit (X, Y, Z) ja jäännösvirheiden oikeat arvot (VX, VY, VZ). Mittayksikkönä taulukoissa on metri.

Jordaniakuva 8 absoluuttinen orientointi



Jordaniakuva 8,
absoluuttisen orientoinnin jäännösvirheet

	X	Y	Z	VX	VY	VZ
1	30196.491	55334.22	1079.121	0.701	2.3	-0.799
2	30269.876	55330.14	1083.791	1.906	-1.42	0.201
3	30171.79	55334.498	1080.168	-1.8	4.778	-0.422
4	30031.179	55403.162	1101.119	-2.161	-2.048	1.019
5	30208.901	55347.19	1085.41	1.431	0.78	-0.06
7	30319.431	55315.45	1080.665	0.208	-0.37	-0.145
8	30239.042	55355.387	1093.951	1.142	-3.513	-0.389
10	30334.23	55316.902	1083.59	-2.12	0.032	0.15
20	30271.648	55309.671	1073.964	2.268	-0.229	0.464
21	30348.748	55293.543	1077.913	-2.802	0.403	0.513
22	30341.169	55289.767	1075.513	-1.681	0.267	0.743
24	30153.67	55351.333	1088.147	0.76	0.423	0.987
25	30134.46	55356.649	1087.863	-0.31	1.699	0.973
27	30035.082	55403.317	1100.959	-1.758	-1.763	-0.831
28	30332.839	55290.354	1074.579	-2.371	0.454	1.369
29	30072.871	55376.822	1087.998	-2.409	-0.168	0.328
30	30164.511	55370.052	1095.471	1.121	-3.148	-0.539
31	30199.788	55329.367	1075.45	0.588	4.047	-0.23
32	30184.435	55350.317	1085.86	-1.765	0.557	0.26
34	30208.726	55325.592	1075.239	0.696	2.642	-0.331
35	30293.549	55364.108	1093.469	0.219	-1.602	-1.811
36	30306.333	55361.771	1093.342	-0.607	-0.739	-1.658
37	30244.11	55355.228	1093.995	0.43	-2.682	-0.345
38	30331.567	55330.934	1086.079	3.227	-1.056	-0.401
40	30242.557	55319.942	1080.157	3.707	-0.188	0.217
41	30225.827	55353.056	1091.77	-0.113	-0.184	0.2
42	30259.269	55336.299	1085.009	2.719	0.729	-0.501
43	30301.033	55328.375	1083.055	-0.307	-0.195	-0.485
45	30343.901	55275.724	1070.831	-0.919	0.194	1.521



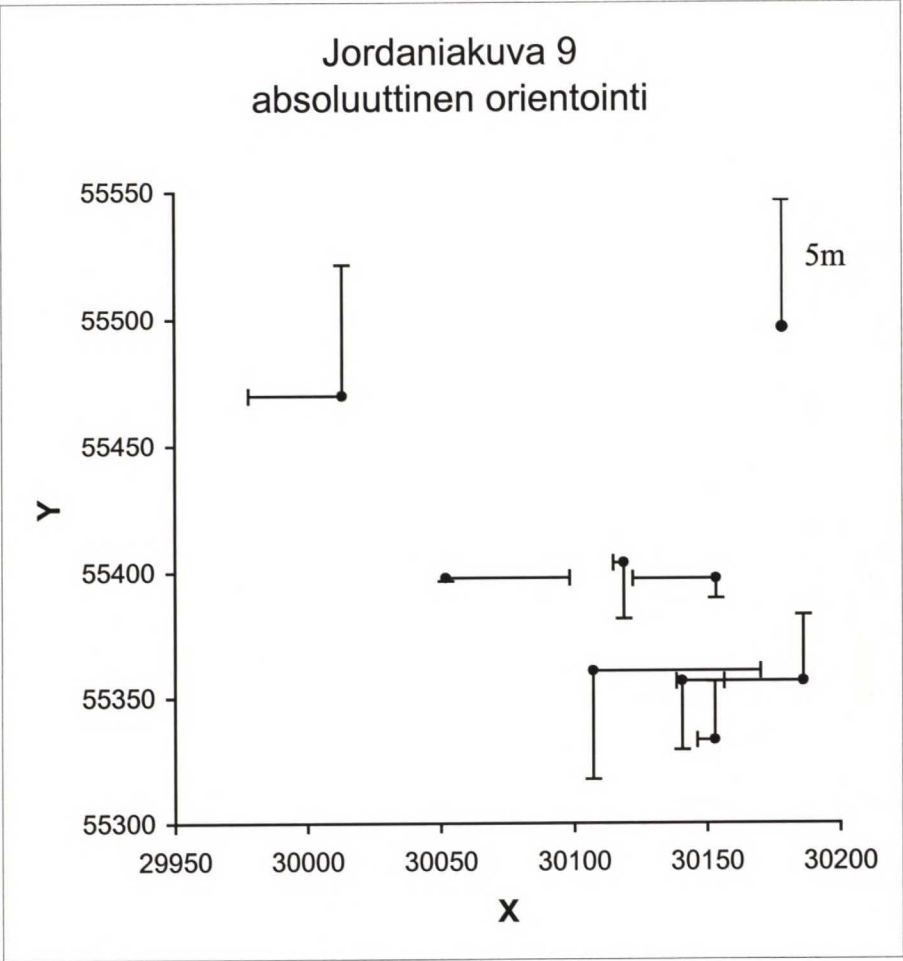
Jordaniakuva 8,
ulkoisen orientoinnin jäännösvirheet

vasen kuva

	X	Y	Z	VX	VY	VZ
2	30267.97	55331.56	1083.59	-0.508	0.267	0.084
5	30207.47	55346.41	1085.47	0.783	0.014	-0.188
7	30319.223	55315.82	1080.81	-0.181	0.207	-0.026
21	30351.55	55293.14	1077.4	0.063	-0.099	0.137
28	30335.21	55289.9	1073.21	0.178	-0.357	-0.084
33	30206.05	55335.56	1080.44	-0.154	-0.022	-0.132
34	30208.03	55322.95	1075.57	-0.551	0.013	0.244
37	30243.68	55357.91	1094.34	-0.191	0.049	-0.186
113	30062.871	55401.246	1094.257	-0.311	-0.259	-0.171
114	30030.666	55431.744	1111.837	-0.252	-0.185	-0.368
116	30175.83	55374.681	1095.923	0.655	0.158	-0.161
120	30101.503	55413.807	1103.653	0.47	0.213	0.85

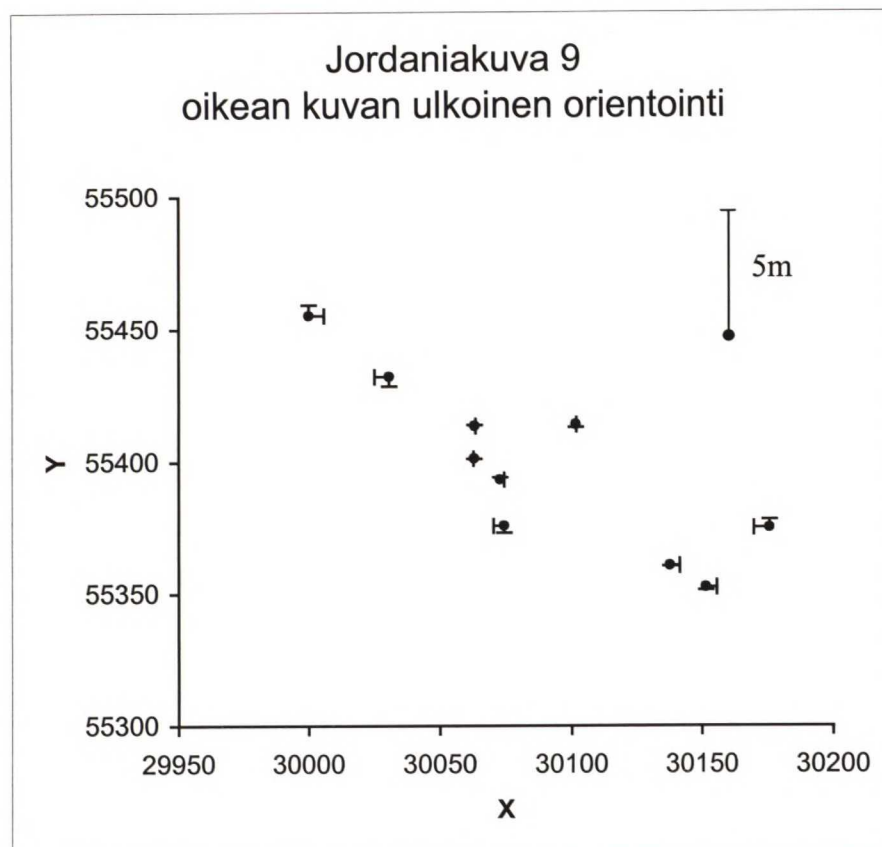
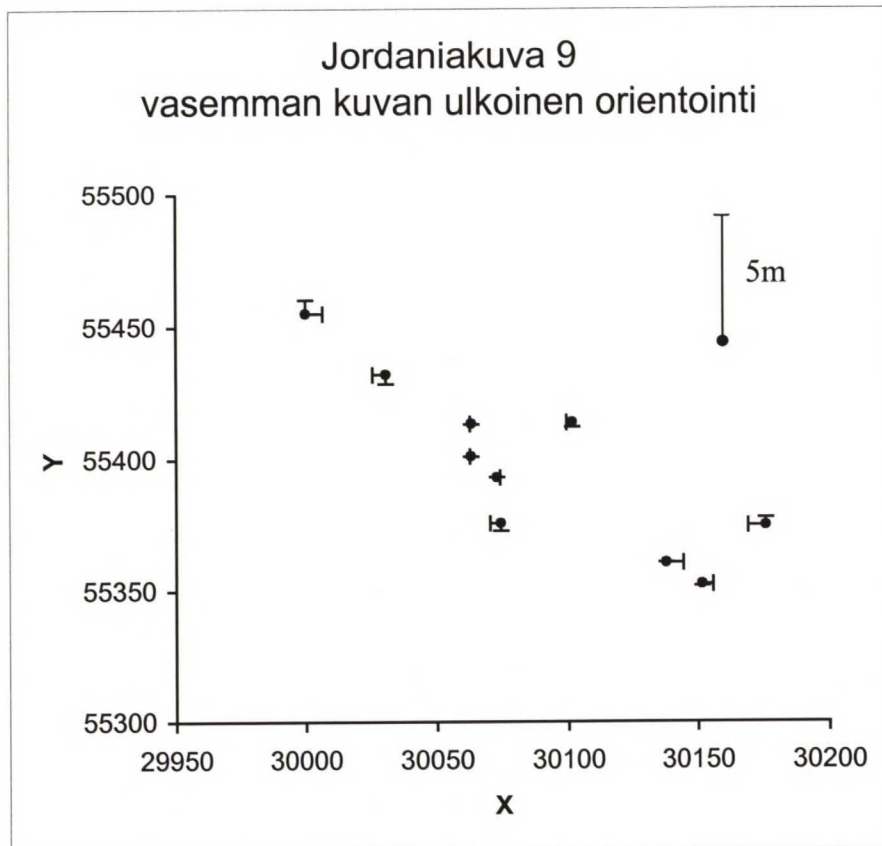
oikea kuva

	X	Y	X	VX	VY	VZ
2	30267.97	55331.56	1083.59	-0.587	0.242	0.223
5	30207.47	55346.41	1085.47	0.563	0.055	-0.168
7	30319.223	55315.82	1080.81	-0.324	0.311	-0.048
8	30237.9	55358.9	1094.34	0.026	-0.006	0.098
21	30351.55	55293.14	1077.4	-0.025	0.03	-0.08
28	30335.21	55289.9	1073.21	0.343	-0.611	-0.326
33	30206.05	55335.56	1080.44	0.098	0.065	0.345
34	30208.03	55322.95	1075.57	-0.394	-0.05	0.053
37	30243.68	55357.91	1094.34	-0.062	0.009	0.003
113	30062.871	55401.246	1094.257	-0.205	-0.171	-0.262
114	30030.666	55431.744	1111.837	-0.148	-0.094	-0.376
116	30175.83	55374.681	1095.923	0.55	0.159	-0.014
120	30101.503	55413.807	1103.653	0.165	0.061	0.543



Jordaniakuva 9,
absoluuttisen orientoinnin jäännösvirheet

	X	Y	Z	VX	VY	VZ
1	30153.414	55397.417	1102.818	-3.137	-0.786	-0.135
2	30140.557	55356.371	1088.823	1.579	-2.706	-0.29
3	30051.931	55397.792	1095.377	4.643	-0.125	-0.351
4	30107.163	55360.332	1087.259	6.293	-4.289	-0.222
6	30118.694	55403.579	1105.304	-0.4	-2.227	-0.601
7	30186.096	55356.376	1087.395	-4.769	2.65	0.063
8	30152.875	55333.202	1081.234	-0.66	2.297	-0.103
9	30013.306	55469.963	1127.775	-3.549	5.185	1.639



Jordaniakuva 9,
ulkoisen orientoinnin jäännösvirheet

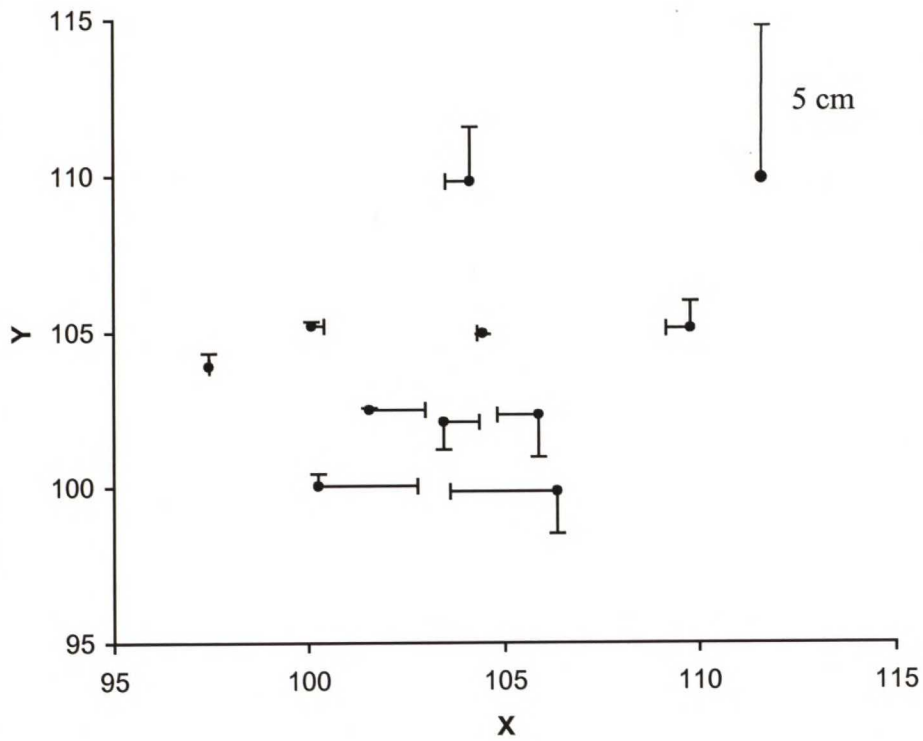
vasen kuva

	X	Y	X	VX	VY	VZ
11	30072.609	55393.237	1091.441	0.132	0.008	-0.186
12	30074.15	55375.464	1087.631	-0.409	-0.292	-0.134
13	30062.871	55401.246	1094.257	-0.042	-0.019	0.293
14	30030.666	55431.744	1111.837	-0.496	-0.345	-0.199
15	29999.998	55455.242	1124.347	0.672	0.524	0.056
16	30175.83	55374.681	1095.923	-0.676	0.29	-0.624
18	30062.976	55413.349	1099.312	-0.049	-0.019	-0.16
19	30137.629	55360.379	1088.64	0.667	0.012	0.124
20	30101.503	55413.807	1103.653	-0.222	-0.17	1.007
21	30151.489	55352.419	1087.407	0.424	-0.061	0.329

oikea kuva

	X	Y	Z	VX	VY	VZ
11	30072.609	55393.237	1091.441	0.165	0.092	-0.224
12	30074.15	55375.464	1087.631	-0.402	-0.271	-0.263
13	30062.871	55401.246	1094.257	-0.034	-0.012	-0.284
14	30030.666	55431.744	1111.837	-0.547	-0.369	-0.094
15	29999.998	55455.242	1124.347	0.581	0.421	0.141
16	30175.83	55374.681	1095.923	-0.604	0.32	-0.647
18	30062.976	55413.349	1099.312	0.039	0.033	-0.183
19	30137.629	55360.379	1088.64	0.376	-0.018	0.481
20	30101.503	55413.807	1103.653	0.015	-0.088	0.851
21	30151.489	55352.419	1087.407	0.41	-0.108	0.244

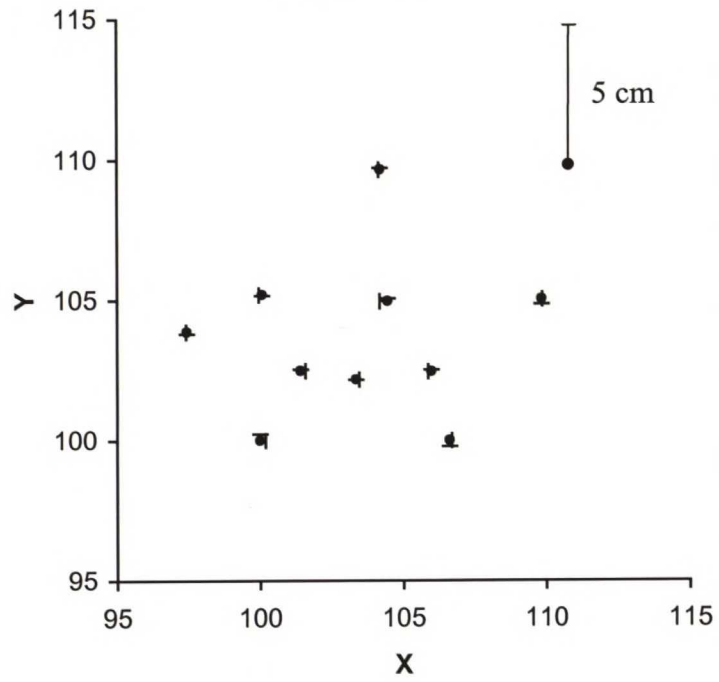
Amfikuva 10
absoluuttinen orientointi



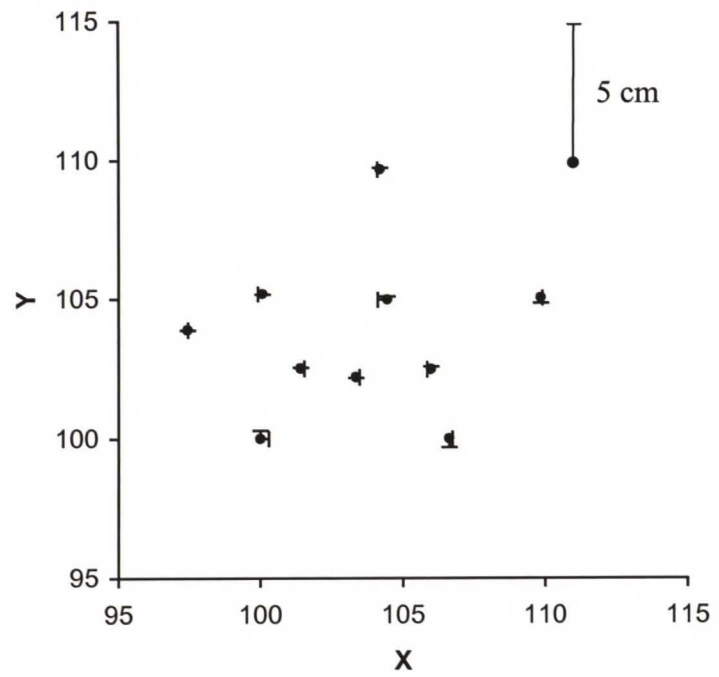
Amfikuva 10,
absoluuttisen orientoinnin jäännösvirheet

	X	Y	Z	VX	VY	VZ
1	100.252	100.039	99.951	0.252	0.039	-0.049
2	103.44	102.107	100.221	0.091	-0.09	-0.016
3	106.343	99.866	99.977	-0.274	-0.134	-0.023
4	101.549	102.516	100.703	0.142	0.006	-0.012
5	105.873	102.344	101.125	-0.106	-0.138	-0.079
6	104.439	104.962	102.134	-0.014	-0.003	-0.032
7	100.094	105.199	102.669	0.032	0.014	0.021
8	97.443	103.922	103.194	0.002	0.042	0.06
9	109.783	105.114	104.092	-0.062	0.089	-0.012
10	104.124	109.826	105.202	-0.063	0.175	0.142

Amfikuva 10
vasemman kuvan ulkoinen
orientointi



Amfikuva 10
oikean kuvan ulkoinen orientointi



Amfikuva 10,
ulkoisen orientoinnin jäännösvirheet

vasen kuva

	X	Y	Z	VX	VY	VZ
1	100.0	100.0	100.0	0.019	0.023	0.022
2	103.349	102.197	100.237	0.011	-0.001	-0.002
3	106.617	100.0	100.0	0.008	-0.021	-0.032
4	101.407	102.51	100.715	0.017	0.005	0.019
5	105.979	102.482	101.204	-0.011	0.006	-0.017
6	104.453	104.965	102.166	-0.028	0.009	-0.027
7	100.062	105.185	102.648	-0.011	-0.003	-0.006
8	97.441	103.88	103.134	-0.002	-0.007	0.017
9	109.845	105.025	104.104	0.002	-0.018	0.043
10	104.187	109.651	105.06	-0.004	0.006	-0.017

oikea kuva

	X	Y	Z	VX	VY	VZ
1	100.0	100.0	100.0	0.029	0.03	0.028
2	103.349	102.197	100.237	0.012	-0.002	0.001
3	106.617	100.0	100.0	0.012	-0.032	-0.041
4	101.407	102.5	100.715	0.012	0.003	0.021
5	105.979	102.482	101.204	-0.013	0.009	-0.018
6	104.453	104.965	102.166	-0.034	0.012	-0.022
7	100.062	105.185	102.648	-0.015	-0.003	-0.004
8	97.441	103.88	103.134	0.001	-0.002	0.011
9	109.845	105.025	104.104	0.005	-0.02	0.04
10	104.187	109.651	105.06	-0.009	0.006	-0.016

Tukipisteiden standardisoidut jäännösvirheet

Standardisoidut jäännösvirheet on annettu vain absoluuttisesti orientoituille kuville. Standardisoitujen jäännösvirheiden painokertoimet ovat ykkösiä ts. ne ovat yhtä tarkkoja. Standardisointi poistaa siis geometriasta johtuvat erot havaintojen välillä. Standardisoituja jäännösvirheitä voidaan käyttää havainnoissa olevien karkeiden virheiden etsintään. (Inkilä, 1999)

Jordaniakuva 8, absoluuttisen orientoinnin
standardisoidut jäännösvirheet

	SVX	SVY	SVZ
1	0.445	1.465	-0.513
2	1.211	-0.902	0.128
3	-1.15	3.06	-0.276
4	-1.515	-1.438	0.719
5	0.908	0.495	-0.038
7	0.134	-0.238	-0.093
8	0.724	-2.236	-0.251
10	-1.373	0.021	0.097
20	1.444	-0.146	0.3
21	-1.833	0.264	0.338
22	-1.096	0.174	0.493
24	0.488	0.271	0.637
25	-0.201	1.1	0.633
27	-1.227	-1.233	-0.584
28	-1.541	0.296	0.906
29	-1.618	-0.113	0.221
30	0.719	-2.023	-0.348
31	0.373	2.586	-0.149
32	-1.124	0.355	0.166
34	0.442	1.686	-0.214
35	0.14	-1.03	-1.272
36	-0.389	-0.477	-1.177
37	0.273	-1.708	-0.223
38	2.085	-0.684	-0.265
40	2.351	-0.12	0.139
41	-0.072	-0.117	0.128
42	1.725	0.462	-0.318
43	-0.196	-0.125	-0.312
45	-0.602	0.128	1.048

Jordaniakuva 9, absoluuttisen orientoinnin
standardisoidut jäännösvirheet

	SVX	SVY	SVZ
1	-1.048	-0.267	-0.053
2	0.526	-0.903	-0.098
3	1.623	-0.045	-0.137
4	2.073	-1.429	-0.079
6	-0.131	-0.735	-0.205
7	-1.714	0.958	0.024
8	-0.231	0.807	-0.039
9	-1.769	2.64	0.918

Amfikuva 10, absoluuttisen orientoinnin
standardisoidut jäännösvirheet

	SVX	SVY	SVZ
1	-1.048	-0.267	-0.053
2	0.526	-0.903	-0.098
3	1.623	-0.045	-0.137
4	2.073	-1.429	-0.079
5	-1.65	2.545	0.321
6	-0.131	-0.735	-0.205
7	-1.714	0.958	0.024
8	-0.231	0.807	-0.039
9	-1.769	2.64	0.918

Keskinäisen orientoinnin jäännösparallaksit

Y-koordinaatin jäännösparallaksit on laskettu jokaiselle keskinäiseen orientointiin osallistuvalla pisteparilla.

Jäännösparallaksi taulukoissa yksikkönä on pikseli.

Pan.kuva Pan.kuva Amfikuva

8	9	10
0.3	0.7	1.1
0.1	0.2	1.1
0.1	1.1	0.5
0	1.4	0.6
0	2.3	0.6
0	1.6	3.1